

Faculté des bioingénieurs

Modélisation du fonctionnement hydrologique du bas-fond d'Itchedjiro au Bénin avec SuperflexPy

Auteur :	Madeleine DE MARNIX
Promoteur :	Prof. Marnik VANCLOOSTER (UCLouvain)
Co-promoteur:	Prof. Irenikatche AKPONIKPE (UP)
Lecteurs :	Alice ALONSO (UCLouvain) Prof. Mathieux JAVAUX (UCLouvain)

Année académique 2023-2024

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme
Bioingénieur en Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais exprimer mon immense gratitude à mon promoteur, Marnik Vanclooster, pour sa patience et ses nombreux conseils qui m'ont énormément aidée lors de la réalisation de ce rapport. Un grand merci également à Alice Alonso, pour l'encadrement et le soutien tout au long de l'année.

Je souhaite remercier aussi Mathias Tidjani pour son aide constante qui a été un facteur déterminant dans la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également remercier toute l'équipe de recherche du laboratoire, nos réunions hebdomadaires m'ont énormément aidée à garder en tête l'objectif et à nourrir ma réflexion.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance au Docteur Togbévi et au Professeur Akponikpe pour l'accueil chaleureux que j'ai reçu lors de la mission de février au Bénin, ainsi que leur aide sur place.

Ce voyage a été rendu possible grâce à la bourse qui m'a été octroyée par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique que je remercie infiniment.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Description du cadre	1
1.2	Objectifs de mémoire	3
2	Etat de l'art	4
2.1	Définition des bas-fonds	4
2.2	Valorisation des bas-fonds pour l'agriculture	6
2.3	Processus hydrologiques impactant le fonctionnement des bas-fonds	7
2.4	Modélisation hydrologique	8
2.4.1	Classification des modèles hydrologiques	8
2.4.2	Exemples de modèles hydrologiques	11
2.5	Modélisation hydrologique des bas-fonds, avec un focus sur les bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest	15
2.5.1	Modélisation hydrologique des bas-fonds	15
2.5.2	Modélisation hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest	16
3	Matériels et méthodes	19
3.1	Méthodologie générale	19
3.2	La commune de Glazoué	20
3.2.1	Démographie et activités agricoles	20
3.2.2	Milieu naturel	21
3.3	Le bas-fond d'Itchedjiro	21
3.3.1	Topographie	21
3.3.2	Pédologie	22
3.3.3	Utilisation du sol	23
3.4	Étude du fonctionnement hydrologique	24
3.4.1	Mesure du débit	24
3.4.2	Séparation du débit	25
3.5	Critique des données d'entrée	27
3.5.1	Mesures sur le terrain	27
3.5.2	Bases de données	30
3.5.3	Comparaison des valeurs	33

3.6	Modélisation avec SuperFlexpy	35
3.6.1	Présentation de SuperflexPy	35
3.6.2	Analyse et validation de la modélisation	37
4	Résultats et discussion	39
4.1	Données observées	39
4.2	Résultats de la séparation du débit	42
4.3	Résultats de la critique des données d'entrée	44
4.3.1	Précipitation	44
4.3.2	Évapotranspiration potentielle	46
4.3.3	Discussion des données d'entrée	47
4.4	Résultats de la modélisation	48
4.4.1	Analyse de la sensibilité	48
4.4.2	Étalonnage	51
4.4.3	Validation	56
4.4.4	Discussion des résultats de la modélisation	57
4.5	Modélisation annuelle	60
4.6	Perspectives	61
5	Conclusion	63
6	Bibliographie	65
7	Annexes	75
7.1	Septs autres événements d'intérêts	75
7.2	Corrélation des cinq événements	76
7.3	Corrélation des données d'entrées	77
7.4	Événement de l'analyse de sensibilité	78
7.5	Validations des septs autres événements	78

Table des figures

1	Différenciation morphopédologique du bas-fond	5
2	Distribution spatiale des modèles. I. Globale, II. Semi-distribué, III. Distribué (Yoo-sefdoost et al, 2022)	10
3	Représentation schématique du modèle GR4J	12
4	Représentation schématique du modèle HYMOD	13
5	Représentation schématique du modèle M4	14
6	Carte des départements du Bénin	20
7	Carte topographique du bas-fond d'Itchedjiro	22
8	Carte de la teneur en argile du sol du bas-fond d'Itchedjiro (SoilGrids, 2020)	22
9	Carte de l'utilisation du sol du bas-fond d'Itchedjiro (Zanaga et al, 2022 ; sur base des données ESA-Worldcover)	23
10	Sonde limnimétrique automatique à l'exutoire (dans le dispositif métallique rouge) .	24
11	Courbe de tarage du limnimètre (Kidirou, 2020)	24
12	Montage du courantomètre à hélice et mesure de la vitesse de l'eau	25
13	Téléchargement des données de précipitations au niveau du pluviomètre automatique, Source : Équipe BAFONBE Bénin, Université de Parakou, Observation de terrain, 2020	28
14	Station hydrométéorologique de Glazoué	30
15	Relation entre une variable de sortie y et un paramètre x	37
16	Précipitation, ET0 et débit mesurés en 2021	39
17	Précipitation et débit événement 2 avant décalage	41
18	Précipitation et débit événement 2 après décalage	41
19	Précipitation et débit événement 4 avant décalage	41
20	Précipitation et débit événement 4 après décalage	41
21	Précipitation et débit événement 8 avant décalage	41
22	Précipitation et débit événement 8 après décalage	41
23	Précipitation et débit événement 12 avant décalage	42
24	Précipitation et débit événement 12 après décalage	42
25	Précipitation et débit événement 15 avant décalage	42
26	Précipitation et débit événement 15 après décalage	42
27	Précipitation et débit séparé selon les deux méthodes décrites	43
28	Comparaison P et P CHIRPS	44
29	Comparaison P et P GPM	45

30	Comparaison P et P GSMap	45
31	Comparaison ETP et ETP MOD16A2	46
32	Comparaison ET0 et ET0 WAPOR	47
33	Linear Reservoir pour événement 4	52
34	GR4J pour événement 4	53
35	HYMOD pour événement 4	55
36	M4 pour événement 4	56
37	Linear Reservoir pour événement 2	57
38	GR4J pour événement 2	57
39	HYMOD pour événement 2	57
40	M4 pour événement 2	57
41	Relation entre la précipitation et le débit sur l'année	60
42	Événement 1	75
43	Événement 3	75
44	Événement 7	75
45	Événement 13	75
46	Événement 18	75
47	Événement 21	75
48	Événement 22	75
49	Corrélation de l'événement 2 avant décalage	76
50	Corrélation de l'événement 2 après décalage	76
51	Corrélation de l'événement 4 avant décalage	76
52	Corrélation de l'événement 4 après décalage	76
53	Corrélation de l'événement 8 avant décalage	76
54	Corrélation de l'événement 8 après décalage	76
55	Corrélation de l'événement 12 avant décalage	77
56	Corrélation de l'événement 12 après décalage	77
57	Corrélation de l'événement 15 avant décalage	77
58	Corrélation de l'événement 15 après décalage	77
59	Corrélation P in situ et P CHIRPS	77
60	Corrélation P in situ et P GPM	77
61	Corrélation P in situ et P GSMap	78
62	Corrélation ETP in situ et ETP MOD16A2	78

63	Corrélation ET0 in situ et ET0 WAPOR	78
64	Événement pluvieux aléatoire	78
65	Linear Reservoir pour événement 1	79
66	GR4J pour événement 1	79
67	HYMOD pour événement 1	79
68	M4 pour événement 1	79
69	Linear Reservoir pour événement 3	79
70	GR4J pour événement 3	79
71	HYMOD pour événement 3	79
72	M4 pour événement 3	79
73	Linear Reservoir pour événement 7	80
74	GR4J pour événement 7	80
75	HYMOD pour événement 7	80
76	M4 pour événement 7	80
77	Linear Reservoir pour événement 8	80
78	GR4J pour événement 8	80
79	HYMOD pour événement 8	80
80	M4 pour événement 8	80
81	Linear Reservoir pour événement 12	81
82	GR4J pour événement 12	81
83	HYMOD pour événement 12	81
84	M4 pour événement 12	81
85	Linear Reservoir pour événement 13	81
86	GR4J pour événement 13	81
87	HYMOD pour événement 13	81
88	M4 pour événement 13	81
89	Linear Reservoir pour événement 15	82
90	GR4J pour événement 15	82
91	HYMOD pour événement 15	82
92	M4 pour événement 15	82
93	Linear Reservoir pour événement 18	82
94	GR4J pour événement 18	82
95	HYMOD pour événement 18	82

96	M4 pour événement 18	82
97	Linear Reservoir pour événement 21	83
98	GR4J pour événement 21	83
99	HYMOD pour événement 21	83
100	M4 pour événement 21	83
101	Linear Reservoir pour événement 22	83
102	GR4J pour événement 22	83
103	HYMOD pour événement 22	83
104	M4 pour événement 22	83

Liste des tableaux

1	Classes de sensibilité	38
2	Analyse de sensibilité du Linear Reservoir	48
3	Analyse de sensibilité du Power Reservoir	49
4	Analyse de sensibilité du Production Store	49
5	Analyse de sensibilité du Routing Store	50
6	Analyse de sensibilité du Unsaturated Reservoir	50
7	Analyse de sensibilité du Upper zone	51
8	Étalonnage du Linear Reservoir	51
9	Étalonnage du modèle GR4J	53
10	Étalonnage du modèle HYMOD	54
11	Étalonnage du modèle M4	55

Acronymes

ARES Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur

BAFONBE Bas-Fonds au Bénin

CHIRPS Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

ET0 Evapotranspiration de référence

ETP Evapotranspiration potentielle

ETR Evapotranspiration réelle

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations

GLUE Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

GPM Global Precipitation Measurement

GR4J Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier

GSMaP Global Satellite Mapping of Precipitation

HYMOD HYdrological MODeL

MOD16A2 Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NSE Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient

RMSE Root Mean Square Error

SWAT Soil and Water Assessment Tool

WAPOR Water Productivity Open-access portal

WHAT Web-Based Hydrograph Analysis Tool

1 Introduction

1.1 Description du cadre

En 2018, 767 millions d'individus dans le monde vivaient encore dans un état d'extrême pauvreté, c'est-à-dire avec moins de \$2.15 par personne et par jour. La moitié de ces personnes se trouvaient en Afrique subsaharienne. Une grande partie d'entre elles vivait dans des zones rurales et donc dépendait fortement de l'agriculture pour subvenir à leurs besoins (FAO, 2018). En conséquence, 828 millions d'individus souffraient toujours de la faim en 2021 (Unicef, 2021).

Au cours de ces dernières années, cette situation s'est encore dégradée. Pendant plus de 20 ans, le nombre de personnes vivant dans l'extrême pauvreté déclinait constamment. Cependant, la crise économique induite par la pandémie du COVID-19 a provoqué un renversement de cette tendance, entraînant une augmentation d'environ 100 millions du nombre de personnes vivant dans l'extrême pauvreté (World Bank, 2021). La guerre en Ukraine a également contribué à l'aggravation de cette situation, due à l'augmentation des prix des céréales, des engrais et de l'énergie (Unicef, 2021).

Le continent Africain est particulièrement vulnérable : il est fortement affecté par les conflits et par les chocs liés au climat. Ces facteurs réduisent la productivité agricole et celle du bétail. De plus, les moyens d'approvisionnement sont souvent limités par un accès difficile aux services, aux technologies et aux marchés, ce qui diminue les rendements et les revenus des agriculteurs (FAO, 2018). Le Bénin fait partie des pays les plus pauvres du monde et contrairement à la tendance mondiale, cette pauvreté ne recule pas. Les régions agricoles sont les plus affectées. Ainsi, avec 1,09 million de personnes en insécurité alimentaire globale, cette problématique constitue un obstacle majeur pour le développement au Bénin (Marius, 2022).

En outre, l'augmentation rapide de la population, surtout de la population urbaine, engendre une pression sur le foncier agricole à mesure que les terres agricoles se transforment en terres bâties. Or, l'agriculture est un outil essentiel pour le développement et la réduction de la pauvreté dans les pays en voie de développement. Cela est certainement le cas pour le Bénin où l'agriculture occupe une place cruciale dans l'économie nationale. Le secteur agricole contribue en effet à hauteur de 34% du PIB et occupe 65% de la population active (Zannou, 2022). Pourtant, les niveaux de production au Bénin restent encore bien en dessous du potentiel offert par les conditions agroécologiques du pays. Les rendements des cultures qui y sont observés représentent à peine le tiers du rendement maximum atteignable (Marius, 2022).

Dans ce contexte, la mise en valeur des terres humides représente un enjeu majeur à haut potentiel pour la sécurité alimentaire et le développement agricole. Les bas-fonds sont des zones de bas paysage dotés d'un fond plat ou concave. Ce sont des vallées inondables jouant le rôle d'axes de drainage dans lesquelles s'écoulent les eaux de ruissellement venant des bassins versants (Souberou, 2016). Pendant une bonne partie de l'année, leurs sols sont engorgés ou submergés par une couche d'eau issue essen-

tiellement des affleurements de la nappe phréatique et des apports par ruissellement. Les bas-fonds se distinguent des marais, car ceux-ci sont, faute d'exutoire, engorgés en permanence (Lavigne Delville, 1996).

La fertilité importante de leurs sols ainsi que leur caractère hydromorphe en font des sites agricoles stratégiques et leur exploitation devient un besoin important pour le développement, l'intensification et la diversification de la production agricole (Souberou, 2017). Cependant, ceux-ci sont encore fortement sous-utilisés. En effet, en Afrique subsaharienne, la superficie des bas-fonds est estimée à 85 millions d'hectares dont seulement 5 à 10% sont utilisés (Chabi, 2010). C'est également le cas au Bénin qui possède pourtant une superficie de bas-fonds de 160 000 ha (Souberou, 2016).

Les raisons pour cette sous-utilisation sont multiples. Tout d'abord, les bas-fonds sont des milieux complexes, fragiles, très variés et dont le fonctionnement est déterminé par les conditions hydriques. Ils sont alimentés par de nombreux flux : pluie, ruissellement, écoulements hypodermiques, écoulements superficiels, nappes phréatiques ou d'altérites et remontées capillaires. Chacun de ces flux à sa propre dynamique et est influencé par de multiples paramètres (climat, structure du paysage et relief, taille et forme du bassin versant et du bas-fond, végétation, etc.). Le fonctionnement hydraulique d'un bas-fond est donc une matière complexe et les méthodes courantes d'estimation des crues utilisées en zones sahéliennes et soudano-sahéliennes ne sont pas adaptées aux zones humides (Lavigne Delville, 1996).

De plus, l'étude hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest souffre d'un manque important de documentation. En effet, la collecte de séries climatiques longues, actualisées et dont la qualité instrumentale peut être vérifiée est un enjeu qui demeure encore compliquée en zone intertropicale (Bigot et al, 2016). Les modèles hydrologiques utilisées aujourd'hui sont également une source de faiblesse, car la plupart ont été développées pour des conditions tempérées telles que retrouvée en Europe. Ainsi, leur transférabilité à des zones caractérisées par un climat très différent, comme le Bénin, est limitée (Jung et al, 2012).

Additionnellement, la tendance des modèles à négliger l'effet de la nappe pour se concentrer sur les ruissellements diminue leur validité et ainsi leur utilité. En effet, la dynamique de la nappe phréatique peut affecter significativement l'état d'humidité du sol, mais ce processus n'est généralement pas simulé par les modèles hydrologiques classiques (Bizhanimanzar, 2019).

L'aménagement hydroagricole d'un bas-fond consiste en un ensemble d'infrastructures telles que des digues de protection (Souberou, 2018). Celles-ci permettent de modifier les flux hydriques afin de mieux répartir l'eau sur l'ensemble du bas-fond et de lever les contraintes agronomiques. Cependant, cet aménagement demande un investissement de travail et/ou de capital important qui n'est pas toujours accessible (Lavigne Delville, 1996). De plus, l'extrême diversité de ces zones et le manque de connaissance approfondie de leur répartition et de leur potentiel freinent les politiques de développement (Chabi, 2010).

1.2 Objectifs de mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet Bas-Fonds au Bénin (BAFONBE) qui a pour objectif de renforcer les connaissances sur le fonctionnement hydrologique de bas-fonds pilotes au Bénin afin de pouvoir mettre en place des aménagements hydrauliques intégrés et durables. Le but ultime étant de renforcer la productivité agricole des agriculteurs locaux et ainsi d'augmenter la sécurité alimentaire de la région (Petit & Vanclooster, 2019). Ce projet est coordonné par le Earth and Life Institute (ELI) en Belgique et l'Université de Parakou au Bénin.

L'objectif de ce mémoire est divisé en quatre sous-objectifs. Le premier objectif est la compréhension précise et détaillée de la nature et des caractéristiques d'un bas-fond. Ceci est réalisé dans la partie intitulée état de l'art qui présente une revue bibliographique reprenant les définitions du terme bas-fond hydrologique dans la littérature ainsi que les caractéristiques, les utilisations et les divers processus hydrologiques de ces zones particulières.

Le deuxième objectif est de déterminer spécifiquement le comportement hydrologique du bas-fond d'Itchedjiro, un bas-fond pilote partiellement aménagé situé dans la commune de Glazoué au Bénin. Ceci est réalisé à l'aide d'instruments de mesures sur le terrain qui permettent de calculer la précipitation qui tombe sur le bas-fond, l'évapotranspiration qui s'en échappe et le débit qui s'écoule à l'exutoire. Ainsi, la relation entre ces trois flux peut être analysée. De plus, afin de préciser l'impact des écoulements de surface par rapport aux écoulements souterrains, une séparation du débit est réalisée à l'aide du logiciel WHAT. Le troisième objectif est d'analyser critiqueusement les mesures de précipitation et d'évapotranspiration faites sur le site en les comparant aux mêmes estimations effectuées par des instruments de télédétection satellitaires.

Le dernier objectif de ce mémoire est de concevoir un modèle du fonctionnement hydrologique d'Itchedjiro. Cette modélisation est effectuée à l'aide d'un framework python (SuperflexPy) qui est disponible pour le public sous forme de code open source. Celui-ci permet de simuler l'effet d'un évènement de pluie sur le bas-fond en utilisant des modèles conceptuels hydrologiques connus. En utilisant les données de terrain récoltées, cette simulation permettra de mieux comprendre le cheminement de l'eau dans le bas-fond.

2 Etat de l'art

Cette partie reprend une analyse de la nature des bas-fonds, de leurs caractéristiques et de leur comportement. Ensuite, un bref aperçu sur le concept de la modélisation hydrologique ainsi que les précédentes études qui ont modélisé le fonctionnement hydrologique des bas-fonds est détaillé avec une attention particulière pour les bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest.

2.1 Définition des bas-fonds

Un bassin versant, aussi appelé bassin hydrographique, est défini comme la zone sur laquelle s'écoulent toutes les eaux de surface vers un même point : l'exutoire. La ligne des crêtes, qui représente la ligne suivant la crête des montagnes, des collines et des hauteurs du territoire, délimite physiquement ce bassin versant. En hydrologie, le bassin versant est considéré comme l'unité géographique sur laquelle est établie l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets. Les bas-fonds sont des portions des réseaux hydrographiques, souvent sujets à l'accumulation de l'eau et dont le lit mineur est peu ou pas marqué. Ils s'inscrivent dans un bassin versant, ainsi les quantités d'eau qui les traversent sont déterminées par la superficie et le taux de ruissellement du bassin (Borgoto, 2008).

En région intertropicale, les bas-fonds sont définis comme les fonds plats ou concaves des vallons, les petites vallées ou encore les axes déprimés qui constituent une partie importante du réseau de drainage élémentaire des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques. Les bas-fonds sont, en Afrique, des "unités de milieu" spécifiques et essentielles au sein du paysage et représentent aujourd'hui une superficie très importante estimée à 1,3 million de km² (Raunet, 1985).

Leur alimentation en eau est multiple : les pluies, les ruissellements, les écoulements superficiels ou hypodermiques, les nappes phréatiques ou d'altérites ainsi que les remontées capillaires et parfois les sources. Chacun de ces flux a une dynamique propre à lui, d'où la complexité du fonctionnement hydraulique du bas-fond et la difficulté de sa modélisation (Delville et al, 1996). Ces apports d'eau résultent également en des sols submergés par une nappe d'eau pour une période plus ou moins longue de l'année, ce qui rend les bas-fonds des zones très intéressantes, notamment pour la riziculture (Raunet, 1985).

Diverses familles de bas-fonds peuvent être distinguées en fonction du régime hydrologique, des matériaux, de la morphologie et de l'utilisation faite par l'homme. Trois groupes importants pour l'Afrique de l'Ouest sont les bas-fonds sahéliens, les bas-fonds des régions soudano-sahéliennes et ceux des régions soudano-guinéennes (Albergel, 1988). Pour ce travail, l'intérêt se porte sur les bas-fonds des régions soudano-guinéennes. Ces régions sont caractérisées par une pluviométrie annuelle moyenne de 1 100 à 1 200 mm, une humidité relative de 31% à 98% et une température annuelle de 25°C à 29°C (Lawin et al, 2019).

Les bas-fonds des régions soudano-guinéennes forment des réseaux assez denses et sont caractérisés par des sols d'une très faible porosité, surtout au centre. En conséquence, la nappe souterraine est plutôt alimentée par les pluies infiltrées sur les versants (Albergel, 1988). La végétation présente est généralement une forêt sèche ou bien une savane arborée.

De plus, les bas-fonds se différencient généralement d'amont en aval et transversalement en trois tronçons sur les plans morphologique et pédologique (cf. figure 1). Le premier tronçon, la tête, représente l'extrême amont du bas-fond. Il est caractérisé par une forme très souvent élargie en « amphithéâtre », des sols de nature plutôt sableuse et une nappe phréatique affleurant avec un certain décalage par rapport à la saison pluvieuse et s'écoulant par la suite vers l'aval.

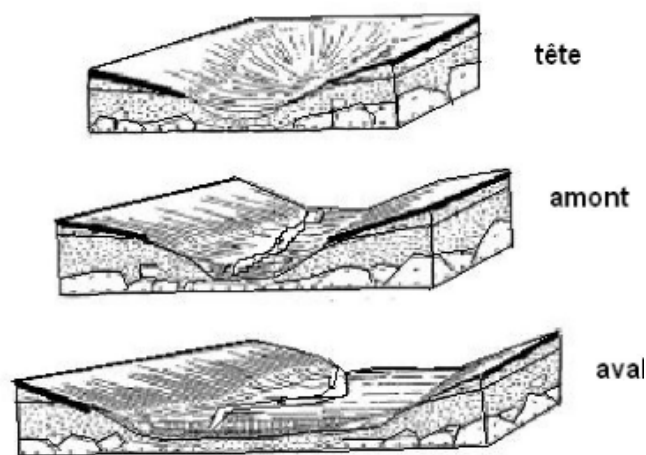


FIGURE 1 – Différenciation morphopédologique du bas-fond

Le deuxième tronçon, toujours en amont du bas-fond, est marqué par un profil transversal plus horizontal au centre, mais avec cependant des flancs encore distinctement concaves (en « berceau »). Un cours d'eau net ne peut pas encore être observé. Les sols sont de type sableux en bordure et argilo-sableux au centre. Deux nappes d'eau libre sont retrouvées dans l'axe du bas-fond : une nappe profonde et, durant la saison des pluies, une nappe d'inondation qui sont séparées par un matériau plus ou moins imperméable.

Enfin, le troisième tronçon, en aval, présente un profil transversal fortement horizontal à sols plutôt argileux et entaillé par un cours d'eau. Il est caractérisé par une nappe phréatique général ainsi qu'une nappe perchée dont la fluctuation est liée aux écoulements dans le cours d'eau qui traverse la vallée (Raunet, 1985).

2.2 Valorisation des bas-fonds pour l'agriculture

Les bas-fonds représentent une facette du paysage très particulière et intéressante pour l'agriculture. Un de leurs avantages principal est une fertilité régulièrement renouvelée par des apports alluviaux ou colluviaux (Kchouk et al, 2015). Un autre exemple est la présence plus longue de l'eau ainsi que la concentration des écoulements superficiels et souterrains. Cette caractéristique favorise d'une part la mise en culture avec des variétés plus exigeante en eau comme le sorgho ou le riz dans les régions plus sèches et d'autre part la mise en culture avec des variétés à cycle plus long et à plus fort rendement dans les régions plus arrosées (Albergel et al, 1993).

En outre, une étude de cas sur des bas-fonds au Burkina Faso (Serpantié et al, 2019) a conclu que les sols hydromorphes du bas-fond étaient les plus fertiles du terroir d'étude. Avec une composition d'environ 50% en argile gonflante ainsi qu'une forte richesse en limons et en matières organiques, ces bas-fonds présentaient une bonne rétention en eau et une capacité d'échange importante (Serpantié et al, 2019).

Ces caractéristiques permettent donc aux bas-fonds d'avoir un rôle multifonctionnel et contre-aléatoire (moins risqué) avec des productions diversifiées en milieu humide ainsi qu'en contre-saison. Ils focalisent des enjeux importants pour la sécurité alimentaire et le revenu des agriculteurs via notamment le maraîchage, le riz, l'élevage et la production de bois (Serpantié et al, 2019).

Néanmoins, ces zones ont longtemps été soumises à une agriculture extensive et ont été marginalisées à cause des fortes contraintes liées à leur mise en valeur (Kchouk et al, 2015). En effet, ce sont des paysages particulièrement changeants et vulnérables à de nombreuses contraintes. En zone soudano-guinéenne, l'inondation représente un problème important avec des averses successives sur plusieurs jours qui peuvent submerger et ainsi asphyxier les cultures présentes dans les zones basses. Inversement, les poches de sécheresse représentent également une contrainte à la mise en valeur agricole.

Afin de lever ces contraintes, les aménagements hydroagricoles représentent une méthode cruciale. De nombreuses solutions techniques existent, toutes visant la maîtrise de l'eau. Les ouvrages les plus simples sont les digues filtrantes, celles-ci aident à maintenir assez longtemps un niveau d'eau plus élevé et permettent donc également de minimiser les risques d'arrachage et de verse. Des exemples d'ouvrages plus élaborés sont des barrages demi-souterrains avec digue déversante ou des micro-barrages avec batardeaux. Ces aménagements sont plus coûteux, mais assurent une meilleure sécurisation lors de l'alimentation hydrique des cultures ainsi qu'une plus grande protection contre les crues (Albergel et al, 1993).

2.3 Processus hydrologiques impactant le fonctionnement des bas-fonds

Par leur nature et leur multiple alimentation en eau, les bas-fonds sont caractérisés par de nombreux processus hydrologiques. Tout d'abord, dans la zone climatique soudano-guinéenne, alimentée par une pluviométrie annuelle moyenne variant entre 1 100 et 1 200 mm (Lawin et al, 2019), la majorité de l'écoulement dans le bas-fond provient du ruissellement pendant la crue et l'immédiate après-crue. Un écoulement presque permanent peut-être observé pendant toute la saison des pluies (Albergel, 1988).

Avec pour objectif final de mieux comprendre les processus de génération de ruissellement, une étude (Gonzales et al, 2009) a comparé différentes approches de séparation des flux de base dans un bas-fond des Pays-Bas. Ainsi, plusieurs méthodes de séparation des flux de base, certaines avec des traceurs et certaines sans, ont été appliquées aux séries temporelles de débit. Les résultats ont montré que les niveaux des eaux souterraines réagissaient rapidement aux événements de précipitations dans ce bas-fond caractérisé par des nappes phréatiques peu profondes. En conclusion, il est estimé qu'environ 90% du débit total à l'exutoire représente des eaux souterraines déplacées par les précipitations et seulement 10% sont du ruissellement de surface.

Le statut hydrique d'un bas-fond est également fortement lié à la perméabilité de son sol. En effet, un sol perméable induira une forte infiltration de l'eau et en conséquence une recharge importante de la nappe. La vitesse d'infiltration ou de perméabilité d'un sol consiste en la quantité d'eau qui pénètre dans le sol par unité de surface et par unité de temps. En période de sécheresse, moins d'eau sera présente dans les couches superficielles du sol en dehors des remontées de la nappe si celle-ci n'est pas profonde (Hounkpé et al, 2020).

En 1995, une étude a été réalisée par Dussarrat & Ferry avec pour objectif de réaliser un bilan hydrique et minéral d'un bas-fond de Madagascar. De nombreuses analyses ont été réalisées, notamment l'enregistrement du niveau des nappes à l'aide de mesures piézométriques. En effet, pour réaliser un bilan hydrologique d'un bas-fond, une identification des différents réservoirs est nécessaire, ainsi qu'un examen du cheminement de l'eau et une quantification du volume suivant le principe de la conservation des masses. Par exemple, une caractérisation du fonctionnement du système aquifère est nécessaire.

Les résultats de l'étude de Dussarrat & Ferry ont montré que les nappes souterraines des bas-fonds sont alimentées en eau par des écoulements verticaux ou latéraux provenant soit du réseau de surface, soit d'autres nappes. Pour commencer, les pratiques culturales effectuées juste avant la saison des pluies modifient le comportement du recouvrement en déstructurant l'horizon et ainsi favorisant les infiltrations depuis la surface. Ainsi, des transferts de flux verticaux descendants peuvent être observés au début du cycle pluvieux. Ensuite, durant la fin du cycle pluvieux et le début de la saison sèche, des transferts de flux verticaux ascendants peuvent s'opérer jusqu'à la surface. Ensuite, ces transferts s'inversent lors de la fin de la saison sèche (Dussarrat & Ferry, 1995).

2.4 Modélisation hydrologique

Cette sous-section détaille le concept des modèles hydrologiques, à savoir les différents modèles utilisés aujourd'hui par les chercheurs, leur fonctionnement, leurs avantages et leurs différences.

2.4.1 Classification des modèles hydrologiques

Dans le cadre de l'étude du fonctionnement hydrologique d'un bas-fond, la mesure de toutes les caractéristiques du système est impossible en raison de l'hétérogénéité de la zone et des limites des techniques de mesure. En conséquence, l'utilisation des modèles hydrologiques est nécessaire. Leur objectif est de prédire le comportement de l'eau dans le bas-fond (ruissellement, infiltration, percolation, remontée capillaire) à partir des données de précipitation et d'évapotranspiration.

Les modèles hydrologiques ont de nombreuses applications importantes. Celles-ci comprennent la gestion des ressources en eau, la prévision des crues, l'amélioration de la compréhension fondamentale des systèmes hydrologiques existants, la gestion de l'eau d'irrigation et l'évaluation de l'impact du changement de l'environnement sur les ressources en eau (Pechlivanidis et al, 2011). Ces modèles sont des outils efficaces. Leur utilisation pour résoudre des problèmes hydrologiques ainsi que leur performance ont fortement augmenté durant les 20 dernières années. Surtout dans les domaines tels que les études d'impact du changement climatique et la simulation des différents processus environnementaux (Parra et al, 2018).

Diverses structures de modélisation hydrologique ont été développées et plusieurs méthodes de classification existent pour tenter de mieux comprendre ce concept. Quelques exemples de catégories de classification importantes sont : la conceptualisation physique, la technique de solution mathématique, la considération du caractère aléatoire, la distribution spatiale, la considération spatiale et la considération temporelle (Vanclooster, 2023).

La conceptualisation physique

La catégorie de classification de loin la plus fondamentale est celle selon la conceptualisation physique. Les modèles peuvent être classifiés comme empiriques, conceptuels, à base physique ou un mélange des trois. Les modèles empiriques sont aussi appelés modèles basés sur les données, car ils cherchent à caractériser la réponse du système en se reposant principalement sur des données existantes sans tenir compte des caractéristiques et des processus du système hydrologique.

Les modèles conceptuels dits à réservoirs sont composés d'un certain nombre de réservoirs interconnectés qui représente les éléments physiques importants de la zone étudiée. Ces réservoirs sont rechargés par les précipitations, l'infiltration et la percolation et sont vidés par notamment l'évaporation, le ruissellement et le drainage (Devia et al, 2015). La structure de ce type de modèles est spécifiée avant le début de la modélisation et les paramètres utilisés n'ont pas tous une interprétation physique

directe. En conséquence, certains de ces paramètres doivent être estimés par étalonnage par rapport aux observations. Les modèles conceptuels varient en complexité selon le nombre et la nature des stockages, un équilibre doit être atteint en fonction des informations disponibles.

Les modèles à base physique, aussi appelés modèles mécanistes, sont des représentations mathématiquement idéalisées d'un processus réel. Ils représentent les processus hydrologiques composants tels que l'évapotranspiration, l'infiltration, le débordement ainsi que l'écoulement de la zone saturée et non saturée à l'aide de diverses équations (Pechlivanidis et al, 2011). Ces modèles nécessitent un grand nombre de données décrivant les caractéristiques physiques de la zone telle que la teneur en humidité du sol, la profondeur initiale de l'eau, la topographie, la topologie et les dimensions du réseau fluvial (Devia et al, 2015).

La technique de solution mathématique

Une autre méthode de classification des modèles est selon le type de calcul utilisé pour résoudre les équations mathématiques ou physiques ainsi que les résultats obtenus par la suite. La technique de solution peut être analytique. Ceci correspond à une expression mathématique exacte qui peut être calculée et qui permet de fournir une résolution complète du problème. Cependant, ce type d'expression est préférable pour des calculs simples, car il peut s'avérer trop compliqué pour des systèmes complexes.

La technique de solution peut également être numérique. Ceci correspond à l'utilisation du calcul itératif pour approximer le résultat du problème en question. En conséquence, la solution finale obtenue n'est pas toujours exacte et peut présenter une certaine marge d'erreur qui varie en fonction de la finesse du maillage. Cette technique de solution est mieux adaptée pour les systèmes complexes ou non linéaires (Vanclooster, 2023).

La considération du caractère aléatoire

Les modèles peuvent être classés comme déterministes quand ils produisent le même résultat à partir d'une simulation avec un seul ensemble de données d'entrée et de valeurs de paramètres. Les modèles classés comme stochastiques permettent eux d'avoir un caractère aléatoire, ils génèrent des résultats différents à partir d'un seul ensemble de données d'entrée et de valeurs de paramètres (Pechlivanidis et al, 2011).

La distribution spatiale

Comme représentées dans la figure 2, les modèles peuvent être définis comme globaux, distribués ou semi-distribués.

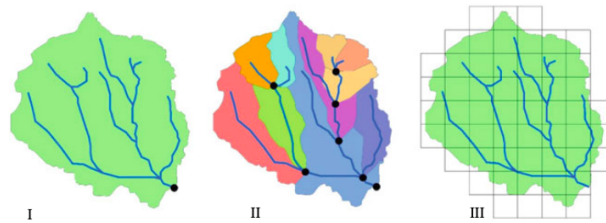


FIGURE 2 – Distribution spatiale des modèles. I. Globale, II. Semi-distribué, III. Distribué (Yoosefdoost et al, 2022)

Les modèles globaux considèrent tout le bas-fond comme une seule unité, avec des variables d'état qui représentent des moyennes globales. Ils sont exprimés par des équations algébriques, sans prendre en compte la variabilité spatiale des processus, des apports, des conditions, des limites et des caractéristiques géométriques du système.

Les modèles distribués discrétisent toute la zone en un certain nombre d'unités, généralement des cellules d'une grille carrée ou un Réseau Triangulé Irrégulier, avec des variables d'état associées à chacune de ces unités représentant des moyennes locales. Ainsi, ces modèles peuvent, dans la mesure du possible, tenir compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du système. Cependant, une certaine généralisation spatiale est encore nécessaire dans chaque unité.

Les modèles semi-distribués combinent les avantages de ces deux types de modèles. Ils discrétisent le bas-fond au niveau jugé utile par le modélisateur. Ainsi, ces modèles permettent de bien représenter les caractéristiques importantes de la zone tout en nécessitant moins de données et de calculs (Pechlivanidis et al, 2011).

La considération spatiale

Les modèles peuvent également être classés selon la taille de la zone à modéliser. Celle-ci peut être notamment une parcelle, un bas-fond, ou bien un bassin versant entier (Vanclooster, 2023).

La considération temporelle

Une classification est aussi possible en fonction du facteur temps. Celle-ci génère notamment les modèles statiques qui excluent la variable du temps et les modèles dynamiques qui l'incluent. Mais également les modèles événementiels qui ne prennent en compte qu'un seul événement de tempête et les modèles continus qui prennent en compte une série chronologique de précipitations (Devia et al, 2015).

2.4.2 Exemples de modèles hydrologiques

Le nombre de modèles hydrologiques ne cesse d'augmenter à un rythme rapide. Cette diversité est notamment due au large éventail d'application qui, toutes, nécessitent une modélisation appropriée. Deux caractéristiques cruciales sont recherchées dans ces modèles : ils doivent être parcimonieux et adaptés au problème à résoudre (Horton et al, 2022). En effet, il est crucial que le modèle ait le juste niveau de complexité. S'il est trop complexe, il peut souffrir d'une surparamétrisation, mais s'il est trop simple, il peut manquer des éléments cruciaux (Parra et al, 2018). Voici quelques exemples.

GR4J

Le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit quotidien de type conceptuel et représenté dans la figure 3 (Perrin et al, 2003). Il est composé de deux réservoirs (production et routage) qui se vident et se remplissent au cours du temps. Cette structure lui permet d'avoir une mémoire des conditions antérieures et de produire un effet tampon sur les apports d'eau et d'énergie (Khediri & Drogue, 2015). La première opération cherche à calculer l'entrée nette dans le modèle. Ainsi, elle consiste en la soustraction de l'ETP de la précipitation pour déterminer soit la pluie nette P_n , soit la capacité d'évapotranspiration nette E_n (Perrin et al, 2003).

$$\begin{array}{ll} \text{if } P > E_{POT} : & \text{else :} \\ P_{NET} = P - E_{POT} & P_{NET} = 0 \\ E_{NET} = 0 & E_{NET} = E_{POT} - P \end{array}$$

Avec P , la précipitation [mm] ; P_{NET} , la précipitation nette [mm] ; E_{POT} , l'évapotranspiration potentielle[mm], E_{NET} , l'évapotranspiration nette [mm].

Dans ce modèle, cette opération est calculée comme s'il y avait un stockage d'interception de capacité nulle (Perrin et al, 2003). Dans le cas où la précipitation nette n'est pas nulle, une partie est utilisée pour remplir le réservoir de production (c'est-à-dire un réservoir souterrain conceptuel) (Bezak et al, 2019). Elle est déterminée en fonction du niveau S dans le réservoir et du paramètre x_1 qui a un effet tampon sur le signal de précipitations nettes. Plus la valeur de x_1 est élevée, plus le rendement du réservoir de production est stable (Khediri & Drogue, 2015). Cette valeur dépend du type de sol dans le bas-fond : plus la porosité du sol est basse, plus la production de ruissellement est élevée et vice-versa (Kumari et al, 2021).

Le réservoir de production est vidé soit par l'évaporation réelle (E_s) si E_n n'est pas nulle, soit par percolation (P_{erc}). Ce flux de percolation est le mouvement vertical de l'eau dans le sol vers la couche inférieure ou la nappe phréatique (Musy & Higy, 2010).

Avec :

- E, évapotranspiration potentielle [mm]
- P, précipitation [mm]
- n, net
- s, sol
- S, niveau de remplissage du réservoir de production [mm]
- P_{erc} , fonction de percolation
- Pr, pluie résiduelle [mm]
- $F(x_2)$, fonction d'échange des eaux souterraines
- R, niveau de remplissage du réservoir de routage [mm]
- Qr, débit retardé [mm]
- Qd, débit direct [mm]
- Q, débit total [mm]
- x_1 , la capacité maximale du réservoir de production [mm]
- x_2 , le coefficient d'échange non atmosphérique [mm]
- x_3 , la capacité à un jour du réservoir de routage [mm]
- x_4 , le temps de base de l'hydrogramme unitaire [jours]

Le ruissellement (P_r) qui atteint les fonctions d'acheminement représente la somme du flux de percolation et de la partie des précipitations nettes qui n'a pas rempli le réservoir de production. Pr est divisé en deux composantes de flux selon une répartition fixe. 90% est conduit vers un hydrogramme unitaire (UH_1) puis un réservoir de routage non linéaire, cela représente un écoulement lent afin que l'eau puisse s'infiltrer dans le sol. Les 10% restants sont conduits uniquement vers un hydrogramme unitaire (UH_2), cela représente un flux rapide à travers la surface du sol (Perrin et al, 2003).

Ces hydrogrammes permettent de simuler le décalage temporel entre l'événement pluvieux et le pic de débit qui en résulte. Ils dépendent du même paramètre x_4 qui est calculé comme le moment où

l'hydrogramme de crue atteint son pic pendant la simulation du modèle. Plus sa valeur est élevée, plus le décalage sera élevé et plus la pointe de crue sera atténuée (Khediri & Drogue, 2015).

Le réservoir de routage implique un échange d'eau souterraine avec le paramètre x_2 qui contribue à équilibrer le bilan d'eau du modèle. x_2 représente la quantité maximale d'eau qui peut quitter ou rentrer lorsque le niveau du réservoir de routage est égal à x_3 . Si x_2 est positif, de l'eau est ajoutée au réservoir d'acheminement à partir de l'aquifère (le bassin 'gagne' de l'eau), s'il est négatif de l'eau pénètre dans l'aquifère (le bassin 'fuit'). Le paramètre x_3 a un effet tampon sur les précipitations efficaces qui sortent du réservoir de production, plus sa valeur est élevée et plus les crues sont étalées dans le temps. x_3 est estimé par l'eau stockée dans tout le sol poreux et donc dépend du type de sol et de l'activité de la nappe phréatique (Kumari et al, 2021).

HYMOD

HYMOD est un simple modèle conceptuel et parcimonieux qui fonctionne sur un pas de temps journalier. Les données d'entrée nécessaires à cette simulation sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. Le processus de génération du ruissellement est décrit par un modèle de précipitations excessives en tenant compte de l'évapotranspiration potentielle (PET) et de la capacité d'humidité du sol (SM). Ce modèle, représenté dans la figure 4 (Singh & Bárdossy, 2012), suppose que la structure et la texture du sol ainsi que la capacité de stockage de l'eau varient à travers le bassin versant. Par conséquent, pour calculer cette variabilité spatiale, une fonction de distribution cumulative est utilisée qui comprend les paramètres C_{max} et β (Quan et al, 2015).

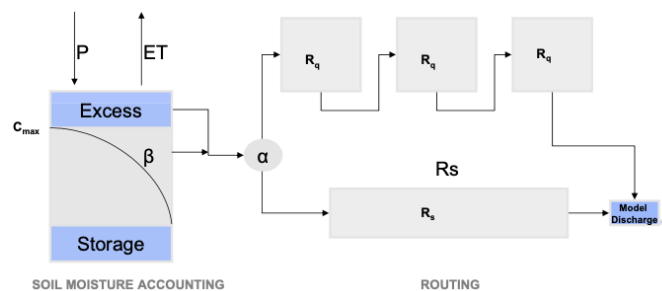


FIGURE 4 – Représentation schématique du modèle HYMOD

Avec :

- C_{max} , la capacité maximale de stockage d'eau du bassin [mm]
- β , le degré de variabilité spatiale de la capacité hydrique du sol au sein du bassin
- α , le facteur de distribution de débit
- R_s , le temps de séjour des réservoirs lents
- R_q , le temps de séjour des réservoirs rapides

Sur la base du paramètre α , les précipitations excédentaires sont alors divisées en un flux rapide

et un flux lent. L'écoulement rapide est représenté par trois réservoirs à écoulement rapide identiques qui décrivent le ruissellement de surface. L'écoulement lent est représenté par un réservoir lent qui génère un ruissellement lent en parallèle. Le débit dans le système de routage est contrôlé par le temps de séjour dans chaque réservoir. La somme des totaux de ruissellement lent et rapide est le débit à l'exutoire (Parra et al, 2018).

M4

M4 est un simple modèle global conceptuel. Représenté dans la figure 5 (Kavetski & Fenicia, 2011), il est composé de deux réservoirs et de cinq paramètres. Le premier élément en amont est appelé le réservoir insaturé (UR), il cherche à représenter les processus de génération de ruissellements (par exemple, la séparation entre l'évaporation et le ruissellement). Le deuxième élément est appelé le fast réservoir (FR) et est destiné à représenter les processus de propagation du ruissellement (par exemple, le routage) (Dal Molin et al, 2020).

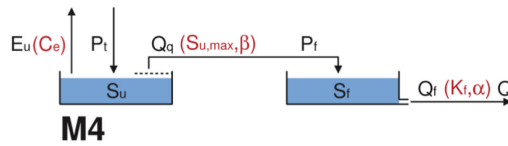


FIGURE 5 – Représentation schématique du modèle M4

Avec :

- | | |
|---|---|
| — S_u , état du réservoir insaturé [mm] | réservoir insaturé [-] |
| — E_u , évapotranspiration actuelle [mm/h] | — P_f , flux d'entrée du fast réservoir [mm/h] |
| — C_e , multiplicateur de l'ETP [-] | — S_f , état du fast réservoir [mm] |
| — P_t , flux d'entrée du réservoir insaturé [mm/h] | — Q_f , débit du fast réservoir [mm/h] |
| — Q_q , débit du réservoir insaturé [mm/h] | — K_f , multiplicateur de l'état du fast réservoir [mm ^{1-α} /h] |
| — S_{max} , stockage maximal du réservoir insaturé [mm] | — α , exposant de l'état du fast réservoir [-] |
| — β , exposant dans la relation du débit du | — Q_t , débit total [mm/h] |

2.5 Modélisation hydrologique des bas-fonds, avec un focus sur les bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest

2.5.1 Modélisation hydrologique des bas-fonds

Une fois que les interactions hydrologiques et hydrauliques entre les différents sous-systèmes des bas-fonds sont déterminés, un modèle hydrologique peut-être développé et évalué pour décrire ces processus de manière fiable. Pour cela, un grand nombre de modèles peuvent être utilisés.

Premièrement, une étude (Pfannerstill et al, 2014) utilisant le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été effectué pour un bas-fond en Allemagne du Nord. Ce modèle est populaire dans les études de modélisation hydrologique, c'est un modèle semi-distribué qui simule le cycle de l'eau, mais aussi les flux des nutriments ou encore l'érosion du sol. C'est également un modèle conceptuel avec de nombreux composants empiriques, ce qui permet une forte complexité et un grand nombre de paramètres. Le bilan hydrique du bas-fond est calculé à partir des variations quotidiennes des réserves d'eau du sol. Le principal apport de ce bilan est la précipitation, ensuite les processus les plus importants dans l'équation du bilan hydrique sont l'évapotranspiration, le ruissellement, la percolation des eaux du sol et l'écoulement des eaux souterraines.

Dans le modèle SWAT, l'eau percole vers les eaux souterraines qui sont divisées en un aquifère peu profond et un aquifère profond. L'aquifère peu profond est libre et contribue donc activement au ruissellement alors que l'aquifère profond est captif et ne peut donc pas contribuer, il est considéré comme inactif. Dans le cadre de l'étude de Pfannerstill et al, un autre concept a été implémenté (SWAT3) dans le modèle en ajoutant des équations de processus supplémentaires et en modifiant certaines existantes. Par exemple, l'aquifère peu profond du SWAT original a été séparé en un aquifère peu profond rapide et un lent (Pfannerstill et al, 2014).

Durant l'étape de l'étalonnage, des ensembles de variations de valeurs de paramètres ont été générés à l'aide du Latin Hypercube Sampling (LHS). Lors de la validation, le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) et le pourcentage de biais (PBIAS) ont été utilisés comme mesures de performance pour le débit modélisé. Les résultats ont montré que le modèle original SWAT fonctionnait moins bien que SWAT3, surtout en période de faible débit. Cela s'explique par le fait que les non-linéarités des processus liés aux eaux souterraines ne peuvent pas être représentées de manière adéquate par un seul stockage actif. Ainsi, grâce à l'addition d'un stockage et de fonctions de délais, le modèle SWAT3 obtient une modélisation de l'eau souterraine plus orientée processus. Cependant, les deux versions de ce modèle ont des difficultés pour la prévision durant les périodes de faible débit. Cela est notamment dû à la nature semi-distribué du modèle, ce qui peut rendre plus difficile la modélisation réelle des écoulements (Pfannerstill et al, 2014).

Une autre étude (Waseem et al, 2020) a été réalisé, cette fois-ci utilisant un modèle hydrologique intégré, MIKE SHE, couplé à un modèle hydrodynamique, MIKE 11, pour caractériser un bas-fond

dans le nord-est de l'Allemagne. MIKE SHE est un modèle distribué basé sur la physique. Il est capable de simuler les processus hydrologiques du bas-fond et permet également la simulation des structures hydrauliques et de leurs stratégies d'exploitation et de contrôle. Le module de mouvement de l'eau de MIKE SHE consiste en six composants décrivant le cycle hydrologique, ceux-ci sont les précipitations/interceptions, l'évapotranspiration, la zone saturée, la zone insaturée, l'écoulement de surface et l'échange entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Un modèle distribué basé sur la physique comme celui-ci a de nombreux avantages, mais nécessite également beaucoup de données d'entrée hydrologiques, des capacités de calcul élevées et des longs temps de calcul. Les critères de performance utilisés pour la validation du modèle de l'étude de Waseem et al étaient l'erreur absolue moyenne, l'erreur quadratique moyenne, le coefficient de corrélation et l'écart type résiduel. En général, les résultats finaux ont montré que ce modèle permettait une description satisfaisante des sous-systèmes hydrologiques en interaction.

De nombreux modèles hydrologiques comme le modèle HBV-96 ou le modèle SWAT sont généralement conçus initialement pour des bassins versants. En conséquence, des problèmes peuvent parfois émerger lors de l'application de ces modèles à des bas-fonds étant donné que les interactions entre les différents sous-bassins ne sont pas exactement les mêmes. Pour éviter ces problèmes, une étude a été effectuée (Sun et al, 2020), en utilisant le modèle WALRUS (Wageningen Lowland Runoff Simulator) qui est un modèle hydrologique groupé destiné à simuler le ruissellement dans les bas-fonds. Il est composé d'un réservoir de sol divisé en une zone non saturée et une zone d'eau souterraine, d'un réservoir à débit rapide et d'un réservoir d'eau de surface. Ce modèle permet de spécifiquement prendre en compte les processus qui sont importants dans les bas-fonds tels que le couplage eaux souterraines – zone insaturée, les voies d'écoulement dépendant de l'humidité, les rétroactions eaux souterraines – eaux de surface et l'infiltration (Brauer et al, 2014).

2.5.2 Modélisation hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest

Une recherche vaste et extensif dans le thème de la modélisation hydrologique existe pour les régions plus riches du monde telles que l'Europe, cette abondance d'études et d'analyses diminue fortement pour les régions plus pauvres tels que l'Afrique de l'Ouest. De nombreux facteurs expliquent cette déficience. Pour commencer, l'un des plus importants est le manque de données. En effet, les données climatiques telles que les précipitations sont plus difficiles à obtenir précisément en raison de la forte variabilité spatio-temporelle, la faible couverture spatiale et le nombre insuffisant de stations de mesure au sol (Wanzala et al, 2022).

Les zones intertropicales reçoivent des précipitations hautement variables dans l'espace et dans le temps, ce qui peut résulter en des extrêmes secs et humides. De plus, cette région est déjà particulièrement affectée par le réchauffement climatique et son impact sur la variabilité hydrologique. Afin de bien représenter les variabilités à petite échelle qui caractérisent les précipitations de cette région, des champs de forçage pluviométrique à résolutions fines sont nécessaires. Cependant, de

telles résolutions ne sont généralement pas atteignables avec les réseaux pluviométriques nationaux en Afrique de l'Ouest, leur densité moyenne étant de 1 pluviomètre pour 10 000 km² au pas de temps journalier (Gascon, 2016).

Le nombre limité de données est un problème pour la modélisation des eaux de surface, mais il est encore plus important pour l'estimation des eaux souterraines. Cette situation n'est qu'aggravée par l'insuffisance des ressources financières et institutionnelles qui freinent la recherche scientifique de haut niveau. Afin de faire face à ce problème, de nombreuses méthodes d'estimation et de prédiction sont utilisées dans la littérature hydrologique. De plus, l'utilisation de la télédétection présente un potentiel important et de fait la recherche africaine sur l'application de la télédétection en hydrologie s'est hautement développée ces dernières années (Hughes et al, 2015).

Par ailleurs, la plupart des modèles hydrologiques ont été développés pour des conditions tempérées. Ainsi, leur transférabilité à d'autres zones peut s'avérer limitée. Ceci est particulièrement vrai pour les modèles groupés, empiriques ou conceptuels en raison de leur manque de représentation physique (Jung et al, 2012). La nature des bassins est également différente entre les régions. Ainsi, les modèles qui sont construits dans les pays développés doivent d'abord être adaptés aux conditions d'écoulement particulières des bassins ouest-africains avant de pouvoir être utilisés (Bouvier, 1989).

Additionnellement, les études hydrologiques des vingt dernières années ont montré une augmentation importante des coefficients d'écoulement dans certaines zones d'Afrique de l'Ouest malgré une diminution marquée de la pluviométrie. De nombreux modèles de simulation hydrologiques utilisés aujourd'hui continuent à ne pas prendre en compte cette dynamique d'évolution du milieu. Ainsi, la qualité de ces modélisations est à mettre en cause (Diello et al, 2006).

Un exemple d'une étude faisant face à ces difficultés est celle réalisée par Bormann & Dieckkrüger en 2004 pour un bassin versant dans le centre du Bénin. Pour ce bassin, une base de données spatiales et temporelles est disponible ainsi que des bases de données simples sur les types de sols, la géologie, la végétation et la topographie. Des séries chronologiques de météo, de précipitations et de débits de cours d'eau sont disponibles en résolution quotidienne pour certaines stations. Cependant, elles souffrent de données manquantes allant de quelques jours à des années entières.

Malheureusement, les propriétés hydrauliques du sol réparties spatialement et les intensités de précipitations réparties à l'échelle régionale ne sont pas disponibles. Pour cette raison, l'utilisation d'un modèle décrivant le processus de génération de ruissellement sur base de processus n'est pas possible sans une collecte de données supplémentaires à l'échelle régionale. Ainsi, l'étude de Bormann & Dieckkrüger a utilisé un modèle conceptuel groupé de type HBV pour la simulation des flux d'eau. Celui-ci est caractérisé par quatre réservoirs de stockages linéaires pour l'eau interceptée, la zone racinaire, la zone du sol non saturée et les eaux souterraines.

Étant donné la faible quantité de données disponibles pour la validation, une analyse approfondie des incertitudes a été réalisée pour vérifier l'applicabilité du modèle dans la région cible. Une première source importante d'incertitudes est les données d'entrée. Ceux-ci ont été calculés à partir de plusieurs stations pluviométriques différentes situées à l'intérieur et à proximité du bassin versant. L'étude de Bormann & Diekkrüger a observé que l'augmentation du nombre de stations pluviométriques prises en compte pour la modélisation conduisait à une amélioration significative des hydrogrammes simulés.

Une deuxième incertitude importante est celle liée aux paramètres du modèle. L'estimation de paramètres de modèle fiables est difficile, particulièrement pour les zones avec une qualité de données limitée. Une manière de quantifier l'effet des incertitudes des paramètres est l'utilisation de la méthode statistique GLUE (Bormann & Diekkrüger, 2004).

3 Matériels et méthodes

3.1 Méthodologie générale

L'objectif général de ce travail se décline en quatre sous-objectifs spécifiques. Le premier est l'appréhension générale de ce qu'est un bas-fond. Ceci est effectué par une revue bibliographique présentée dans la partie état de l'art. Cette section reprend les définitions du terme bas-fond hydrologique dans la littérature ainsi que les caractéristiques, les utilisations et les divers processus hydrologiques de ces zones particulières. Avant d'étudier le fonctionnement d'un bas-fond, il est crucial de comprendre précisément ce qu'on observe et pourquoi.

Le deuxième sous-objectif est d'identifier clairement le fonctionnement hydrologique du bas-fond d'étude. Ceci est réalisé par le biais d'observations et de mesures sur le terrain de la précipitation et du débit à l'exutoire. Afin d'avoir une caractérisation précise de ces écoulements dans le bas-fond, cette analyse est effectuée à l'échelle événementielle avec des événements choisis en fonction de leur corrélation et de leur temps de réaction. De plus, une séparation de ce flux est nécessaire pour pouvoir étudier individuellement l'impact des écoulements de surface et des écoulements souterrains.

Le troisième sous-objectif se porte sur les valeurs de précipitations et d'évapotranspiration potentielle qui représentent les deux valeurs d'entrée des modèles hydrologiques. Celles-ci sont mesurées sur le terrain, mais peuvent également être obtenues à l'aide de base de données génériques. Une comparaison est effectuée entre les deux à fin de définir la fiabilité des valeurs locales.

Le dernier sous-objectif est la réalisation d'un modèle hydrologique simulant le comportement du bas-fond d'étude face aux événements de débits repris dans le deuxième sous-objectif. Cette modélisation est effectuée à l'aide du framework python SuperflexPy et nécessite une analyse de sensibilité, un étalonnage manuel et une validation des résultats.

3.2 La commune de Glazoué

3.2.1 Démographie et activités agricoles

Le Bénin est divisé en 12 départements dont le Département des Collines qui est composé de six communes. Le bas-fond d'Itchedjiro se situe dans la commune de Glazoué au centre de ce département (cf. figure 6). Cette commune a une superficie de 1 750 km² et selon le dernier Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH4) de 2013, sa population est de 124 431 habitants dont 51,8% de femmes et 48,2% d'hommes. Elle compte 68 villages administratifs.

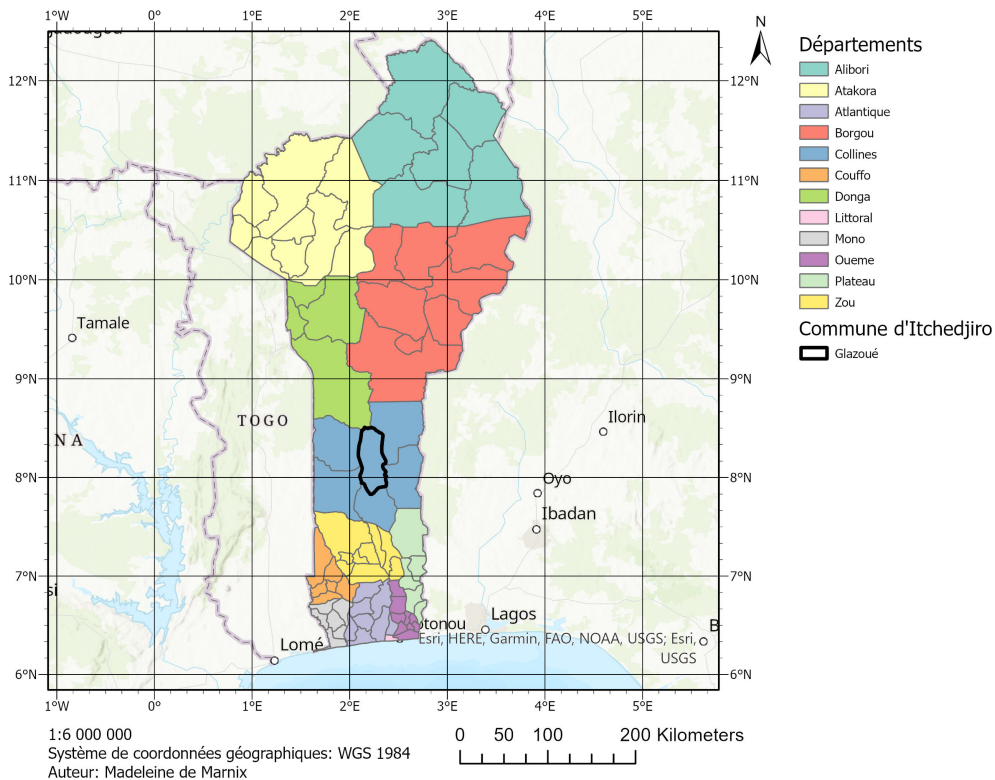


FIGURE 6 – Carte des départements du Bénin

Glazoué est une commune à caractère rural qui bénéficie d'un bon potentiel pour son agriculture. En effet, elle dispose de 150 000 ha de terres cultivables et les productions de riziculture des bas-fonds s'élèvent à plus de 5 000 tonnes par an. L'agriculture est la principale source de revenus pour la majeure partie de la population. Les superficies moyennes sont d'environ deux hectares par exploitation. Les moyens de production utilisés sont plutôt rudimentaires (houes, coupe-coupe, faucilles), certains utilisent aussi la charrue. Les techniques de production employées sont la culture sur brûlis, l'assolement, la jachère, la rotation ainsi que la culture associée.

En ce qui concerne l'élevage, les espèces principales sont les bovins, les caprins, les ovins, les porcins et les volailles. Les éleveurs sont principalement les peulhs sédentaires natifs de la commune et les peulhs nomades venus notamment du Niger et du Burkina Faso. Le pâturage naturel est la principale source d'alimentation de ce bétail. Ce pâturage représente néanmoins une source de conflits

importante entre les agriculteurs et les éleveurs en raison de l'absence d'identification et de sécurisation des espaces pastoraux dans les villages (UVCW, 2023).

3.2.2 Milieu naturel

La commune se situe dans la zone de climat soudano-guinéen et présente deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches avec des aléas. Sur l'année, le nombre total de jours de pluie varie entre 80 et 110 résultant en quatre saisons (INSAE, 2016) :

- Une grande saison de pluie de mars à juillet
- Une petite saison sèche d'août à septembre
- Une petite saison de pluie d'octobre à novembre
- Une grande saison sèche de décembre à mars

La pluviosité totale annuelle de la commune est comprise entre 959,6 et 1 255,5 mm et sa température moyenne varie entre 24 et 29°C. Sur le plan pédologique, une prédominance de sols ferrugineux tropicaux lessivés s'observe ainsi que des sols hydromorphes (Sognon et al, 2020). La végétation est constituée de plantations de tecks ainsi que des formations naturelles telles que des galeries forestières, des forêts claires, des forêts denses sèches, des forêts saxicoles, des savanes boisées, des savanes arborées et des savanes arbustives (Dissou et al, 2018).

La commune est constituée de plateaux d'une altitude entre 200 et 300 mètres et de quelques collines entre 350 et 450 mètres. Au niveau hydrographique, Glazoué est arrosé par un fleuve important nommé Ouémé ainsi que de petits cours d'eau locaux utiles pour le maraîchage de contre saison et la pêche artisanale (Gbenou et al, 2021).

3.3 Le bas-fond d'Itchedjiro

Le bas-fond d'Itchedjiro, dans la commune de Glazoué, est d'une superficie de 161,4 ha et se situe au sein d'un bassin versant de 100 km². Il a été partiellement aménagé, ce qui consiste en la mise en place de diguettes de terre compactées de 30 à 40 cm de hauteur, construites selon les courbes de niveau. Ces diguettes permettent de réguler les écoulements et adoucir les dénivellations, elles protègent également contre l'ensablement du bas-fond (Igue et al, 2011).

3.3.1 Topographie

Le bas-fond est traversé par deux lits mineurs qui se rejoignent pour ensuite se déverser dans un cours d'eau plus grand. Le limnimètre installé à l'exutoire du bas-fond ainsi que le pluviomètre sont visibles dans la figure 7 ci-dessous. Celle-ci montre le relief du site qui présente au maximum un dénivelé de 25 m avec l'exutoire situé au point le plus bas.

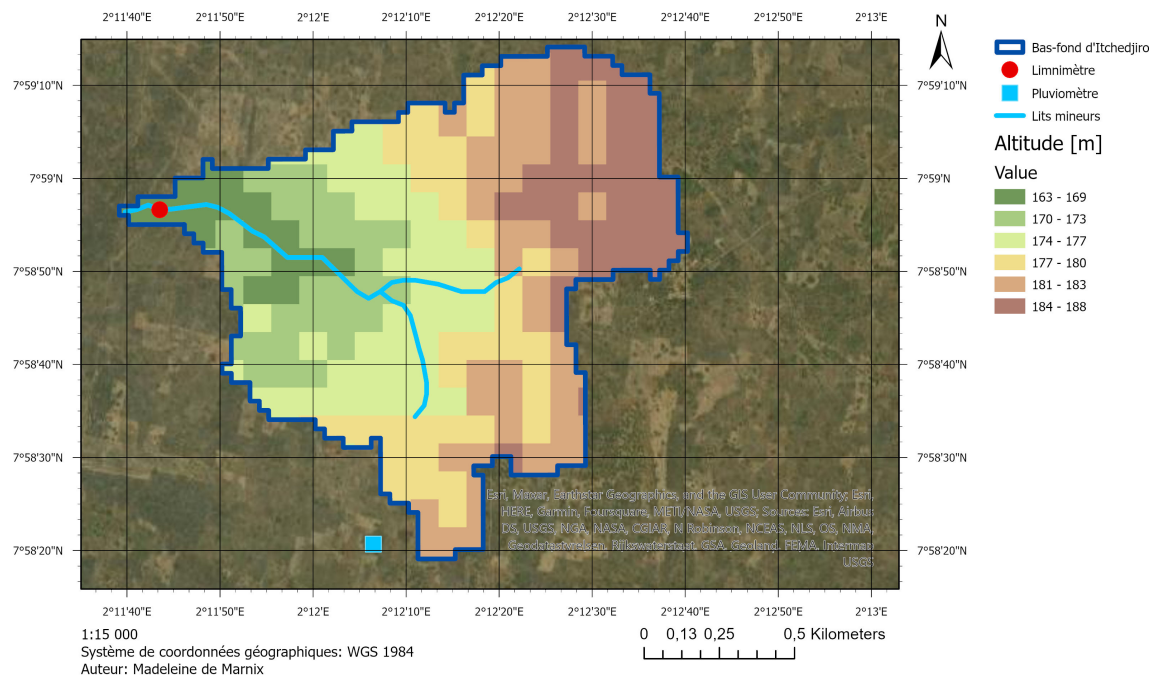


FIGURE 7 – Carte topographique du bas-fond d'Itchedjiro

3.3.2 Pédologie

La carte dans la figure 8 présente la teneur en argile du sol en g/kg pour une profondeur de 0 à 5 cm. Le sol du bas-fond est de type plutôt argileux à limoneux.

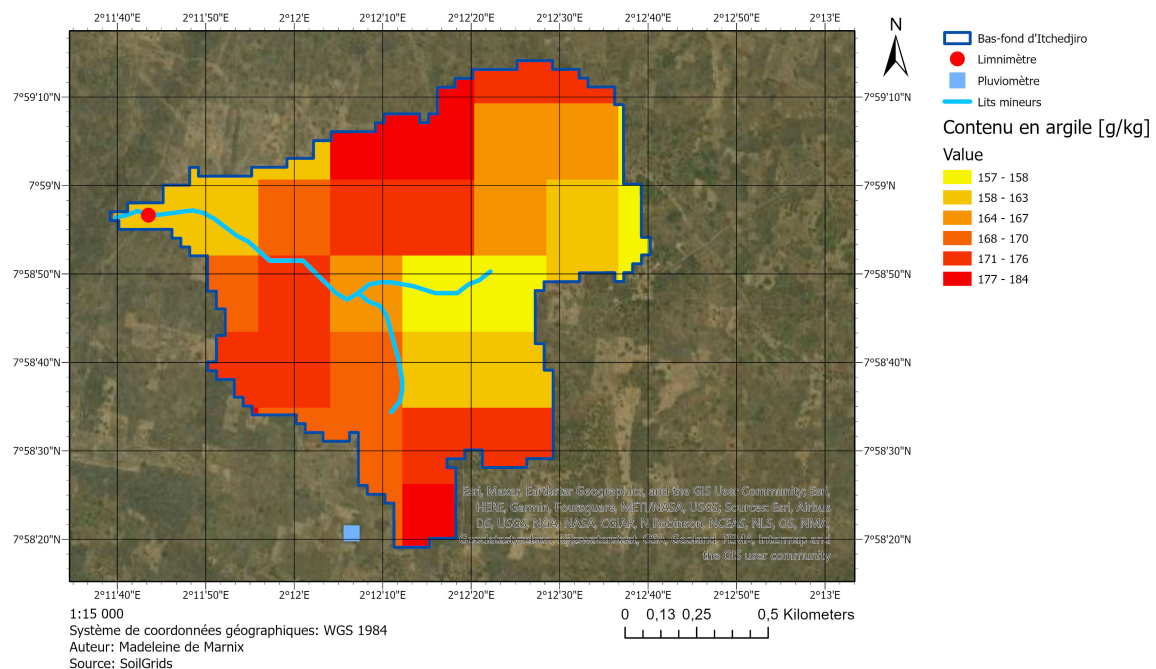


FIGURE 8 – Carte de la teneur en argile du sol du bas-fond d'Itchedjiro (SoilGrids, 2020)

3.3.3 Utilisation du sol

La carte dans la figure 9 montre l'utilisation du sol pour l'année 2021 à 10 mètres de résolution. Ce bas-fond est très majoritairement utilisé pour l'agriculture qui est entourée d'une végétation surtout arbustive et herbacée. Une légère couverture forestière est également observable ainsi qu'une zone bâtie fortement réduite. Les cultures de ce bas-fond sont principalement le riz, le soja, le maïs et l'igname (Kahn, 2022).

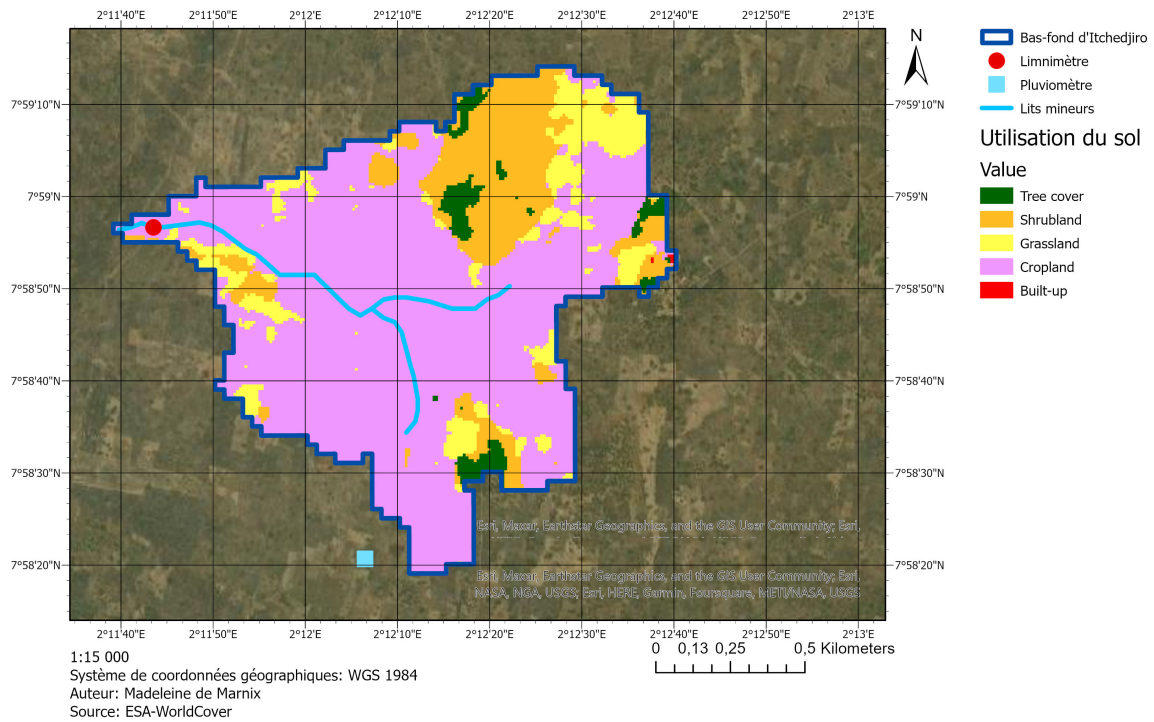


FIGURE 9 – Carte de l'utilisation du sol du bas-fond d'Itchedjiro (Zanaga et al, 2022 ; sur base des données ESA-Worldcover)

3.4 Étude du fonctionnement hydrologique

3.4.1 Mesure du débit

L'écoulement total dans le bas-fond est représenté par le débit du cours d'eau à l'exutoire. Pour le bas-fond d'Itchedjiro, deux méthodes différentes sont utilisées pour mesurer ce débit. La première est l'utilisation d'une échelle limnimétrique automatique. Représenté dans la figure 10, cet instrument mesure en permanence la hauteur de la rivière en un endroit où elle est jugée représentative du débit de manière univoque. Ces données de limnimétrie sont mesurées en centimètres à un pas de temps de 15 minutes.



FIGURE 10 – Sonde limnimétrique automatique à l'exutoire (dans le dispositif métallique rouge)

Ensuite, ces hauteurs d'eau sont converties en mètres et puis sont transformées en estimations de débits (en m^3/s) par l'intermédiaire d'une courbe de tarage (cf. figure 11), celle-ci est établie à partir de mesures ponctuelles de débit appelées couramment jaugeages (Perret, 2008). À fin d'obtenir finalement des volumes d'eau en $\text{mm}/15 \text{ min}$, ces données sont divisées par la surface du bas-fond ($1,614 \text{ km}^2$), multipliées par 1000 et multipliées par 900 (pour passer de secondes à 15 min). Malheureusement, l'incertitude de cette courbe de tarage n'est pas disponible, ce qui ne permet donc pas de savoir l'incertitude liée à la mesure du débit.

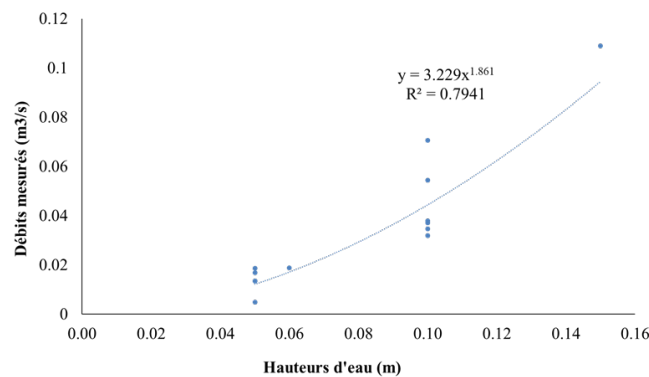


FIGURE 11 – Courbe de tarage du limnimètre (Kidirou, 2020)

La deuxième méthode implique l'utilisation d'un courantomètre à hélice, ou moulinet. Cet instrument, représenté dans la figure 12, mesure la vitesse de l'eau en un point précis. Le moulinet est submergé dans l'eau avec l'hélice face au courant et la pression de l'eau la fait tourner sur elle-même.



FIGURE 12 – Montage du courantomètre à hélice et mesure de la vitesse de l'eau

La vitesse de l'écoulement est déterminée par le nombre de révolutions de l'hélice pendant un intervalle de temps donné et par conversion de ce temps en vitesse à l'aide de la table d'étalonnage du moulinet (Cumps, 2008).

$$v = A.n$$

Avec v , la vitesse de l'écoulement [m/s]; A , le pas géométrique de l'hélice [m]; n , la vitesse de rotation de l'hélice [tours/s] (Perret, 2007).

En prenant de cette façon plusieurs mesures sur une même section, la vitesse de cette section peut être déduite et ainsi le débit du cours d'eau est calculé.

3.4.2 Séparation du débit

Une bonne correspondance entre les débits mesurés et calculés sortant d'un bas-fond n'est pas un critère entièrement suffisant pour la validité d'un modèle hydrologique. Des connaissances supplémentaires au sujet des flux internes sont nécessaires (Eckhardt, 2005). En effet, le processus de ruissellement est contrôlé par de nombreux composants provenant de diverses sources et caractérisés par des temps de séjour différents. La mesure directe de ces composants étant presque impossible, ceux-ci sont généralement déterminés indirectement par la séparation du processus de ruissellement (Yang et al, 2021).

Séparer avec précision ce ruissellement représente un travail onéreux, ainsi les hydrologues limite la séparation à seulement deux composants, le ruissellement de surface et le débit de base. Le

ruissellement de surface est l'écoulement rapide se produisant à la surface du bas-fond lors d'un événement de pluie. Le débit de base est un écoulement « lent » à long terme qui est régulé par les eaux souterraines régionales ainsi que d'autres réserves d'eau retardées. Il existe une large gamme de méthodes de séparation d'hydrogrammes à deux composants, aussi appelées méthodes de séparation du débit de base (Yang et al, 2021).

Deux méthodes de séparation appartenant à la catégorie de filtrage numérique ont été choisies pour ce travail en raison de leur précision, leur popularité et leur facilité d'application. Elles reposent sur deux hypothèses : l'écoulement rapide est la partie haute fréquence du débit qui répond rapidement aux précipitations et le débit de base est la partie basse fréquence qui réagit lentement aux précipitations.

Méthode de Lyne & Hollick

La première méthode, représentée ci-dessous (Xie et al, 2020), est largement utilisée et a été proposée par Lyne et Hollick en 1979. C'est un algorithme de filtrage à paramètre unique basé sur le principe du traitement de signal, ce qui requiert généralement plusieurs passages du filtre (Yang et al, 2021). Cette technique fournit une estimation objective et reproductible d'un indice de débit de base qui est facilement automatisable (Nathan & McMahon, 1990).

$$f_k = \beta f_{k-1} + \frac{1+\beta}{2}(y_k - y_{k-1})$$

En respectant la contrainte $f_k \geq 0$.

Avec f_k , la réponse rapide filtrée à l'instant k [m^3/s]; β , le paramètre du filtre et y_k , le flux original (somme du débit de base et de l'écoulement rapide) à l'instant k [m^3/s]. Le flux de base filtré est donc défini comme étant égale à $y_k - f_k$.

La faiblesse principale de cette méthode est qu'une grande part aléatoire est associée au choix du nombre de passages du filtre ce qui peut augmenter l'incertitude des résultats (Yang et al, 2021).

Méthode d'Eckhardt

La deuxième méthode de séparation du débit de base, représentée ci-dessous (Xie et al, 2020), est la méthode d'Eckhardt. C'est un algorithme de filtrage récursif à deux paramètres qui est fortement populaire en raison de sa base physique claire et de sa simplicité d'utilisation (Yang et al, 2021).

$$b_k = \frac{(1-BFI_{max})\alpha b_{k-1} + (1-\alpha)BFI_{max}y_k}{1-\alpha BFI_{max}}$$

En étant limité par $b_k \leq y_k$.

Avec α , la constante de récession ; BFI_{max} , l'indice de débit de base maximum (le rapport à long terme du débit de base au débit total) ; b_k , le débit de base [m^3/s] et y_k , le débit pour l'intervalle de temps k [m^3/s].

BFI_{max} est déterminé selon les résultats d'une étude sur le terrain des conditions hydrogéologiques. Eckhardt (2008) a suggéré que BFI_{max} soit égal à 0,8 pour les cours d'eau pérennes avec des aquifères poreux, à 0,5 pour les cours d'eau éphémères avec des aquifères poreux et à 0,25 pour les cours d'eau pérennes avec des aquifères de roches dures.

La source principale d'incertitudes de cette méthode est l'hypothèse du réservoir linéaire. Celle-ci assume que le débit sortant de l'aquifère est linéairement proportionnel à son stockage (Eckhardt, 2005). Une autre incertitude est associée au choix de la valeur de BFI_{max} et de α (Yang et al, 2021).

Implémentation des méthodes

Dans le cadre de ce travail, le système WHAT (Web Based Hydrograph Analysis Tool) (Consulté le 2 décembre 2023, disponible sur : <https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT/>) a été utilisé à fin d'appliquer les méthodes de filtrage numérique de Lyne & Hollick et d'Eckhardt aux données mesurées de débit. Ce système a été développé (Lim et al, 2005) pour fournir une interface Web SIG aux États-Unis pour la séparation des débits de base. Il est entièrement automatisé et peut jouer un rôle important pour l'exploitation durable des eaux souterraines et des eaux de surface (Lim et al, 2010).

Le système WHAT ne permet pas de séparer le débit pour des données au pas de temps de 15 min comme celles utilisées lors de la simulation. En conséquence, une séparation des mesures agrégées en données journalières a été effectuée sur toute l'année.

3.5 Critique des données d'entrée

3.5.1 Mesures sur le terrain

Précipitation

Les pluviomètres mesurent la quantité de précipitations tombée à un emplacement précis et sur une période de temps définie, par collecte directe ou indirecte. Cette quantité de précipitations est exprimée en millimètres, correspondant à l'épaisseur de la pellicule d'eau qui recouvrirait une surface horizontale. Ainsi, elle est mesurée dans un récipient dont la surface de captation est connue. Donc, un millimètre de pluie répandu sur un mètre carré correspond à un litre d'eau (Leroy, 2002).

Le pluviomètre à augets basculeurs fait partie des pluviomètres les plus largement utilisés en raison de sa robustesse, son faible coût de production et sa capacité d'économie d'énergie. De plus, il permet

d'obtenir des enregistrements automatiques des précipitations et donc ne nécessite pas des mesures manuelles.

Ce pluviomètre, représenté dans la figure 13, est composé d'un entonnoir qui envoie l'eau dans un premier auget qui se remplit d'eau jusqu'à un volume spécifié et puis bascule sur un axe cylindrique pour se vider et permettre au deuxième auget de se remplir. Ce mouvement est détecté par un aimant situé en dessous de l'axe qui envoie un signal à un enregistreur. Chaque impulsion est définie comme une quantité nominale de pluie fixée auparavant.

Le pluviomètre automatique à auget basculeur utilisé dans cette étude (*cf.* figure 13) est installé dans une ferme près du bas-fond. Les données de précipitations sont enregistrées de manière automatique par évènement pluvieux et à un pas de temps de 15 min grâce au « data logger » du pluviomètre. La collecte de mesure est effectuée chaque semaine avec l'ordinateur de terrain.



FIGURE 13 – Téléchargement des données de précipitations au niveau du pluviomètre automatique,
Source : Équipe BAFONBE Bénin, Université de Parakou, Observation de terrain, 2020

Cependant, cet instrument de mesure présente de nombreuses faiblesses. En effet, un biais mécanique systématique est présent qui sous-estime les précipitations à mesure que leur intensité augmente. Ceci est dû à la perte d'eau lors du mouvement de basculement des augets. Ce basculement commence à l'instant où le volume d'un auget donné est atteint et il nécessite un certain laps de temps. Ce processus génère donc une petite fenêtre temporelle durant laquelle toute l'eau supplémentaire qui tombe dans l'entonnoir n'est pas enregistrée (Segovia-Cardozo et al, 2023).

Une autre faiblesse est l'entonnoir lui-même qui est susceptible de se boucher avec des dépôts de feuilles, de poussières, de fientes d'oiseau ou des insectes. En conséquence, il requiert une surveillance périodique et un entretien régulier. Le vent présente également un problème en empêchant la chute rectiligne des gouttes d'eau. Ce problème est intensifié plus les particules sont légères (Leroy, 2002).

Ainsi, le biais du vent peut causer environ 2 à 10% de sous capture pour les précipitations (Segovia-Cardozo et al, 2023).

Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est une composante clé du cycle hydrologique, car elle a un impact direct sur le ruissellement et le bilan hydrique. Il existe trois concepts distincts. L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente l'évaporation et la transpiration maximale possible dans des conditions idéales (Xiang et al, 2020). L'évapotranspiration réelle (ETR) représente la quantité réelle d'eau qui s'évapore du sol et qui transpire de la végétation, compte tenu de la disponibilité en eau actuelle (Stephenson, 1998).

L'évapotranspiration de référence (ET₀) est définie par la FAO (1998) comme étant « le taux d'évapotranspiration d'une culture hypothétique avec une hauteur de culture supposée (0,12 m), une résistance de surface fixe (70 s/m) et un albédo spécifique (0,23) qui ressemblerait beaucoup à l'évapotranspiration d'une vaste surface de couverture d'herbe verte de hauteur uniforme, croissance active, ombrageant complètement le sol et ne manquant pas d'eau » (Vanclooster, 2023).

Pour estimer l'évapotranspiration de référence d'une zone, de nombreuses méthodes sont disponibles. La version FAO-56 de la méthode de Penman-Monteith a été établie comme un standard en hydrologie. Cependant, cette formule requiert de nombreux paramètres climatiques et l'acquisition de ceux-ci n'est pas facile, car elle nécessite des moyens financiers élevés et une certaine expertise technique (SAMAKE et al, 2021). Ainsi, dans le cadre de ce travail, cette formule n'est pas accessible. À sa place, l'équation de Hargreaves a été choisie, celle-ci est beaucoup plus simple, mais nécessite néanmoins une collecte de quelques données météorologiques. Pour cela, une station hydrométéorologique est utilisée (cf. figure 14).

Cette station se trouve dans la commune de Glazoué non loin du bas-fond d'Itchedjiro. Elle comprend un pluviomètre, un anémomètre (mesure de la vitesse du vent en m/s), une girouette (donne la direction du vent), un pyranomètre (mesure le rayonnement solaire en W/m^2) et un thermo-hygromètre (mesure la température en °C et l'humidité relative de l'air en % du seuil de saturation). Ces instruments de mesure sont reliés à un enregistreur automatique qui fonctionne continuellement grâce à des panneaux solaires.



FIGURE 14 – Station hydrométéorologique de Glazoué

Ensuite, l'ETP peut être obtenue pour une surface en multipliant l'ET₀ calculé par un facteur correctif (K_c) aussi appelé facteur cultural (Vanclooster, 2023). Dans le cadre de ce travail, le facteur correctif exact n'est pas disponible pour le site d'étude. Cependant, celui-ci peut être approximé à l'aide des bulletins de la FAO (Allen et al, 1998). Le K_c dépend principalement du type de culture et du stade de développement auquel elle se trouve. Trois périodes importantes de croissance sont identifiées : la période initiale (mars à juin), la période de mi-saison (juillet à septembre) et la période de fin de saison (octobre à décembre).

Les dates exactes de ces périodes ont été choisies en fonction du type de culture sur le site d'Itchedjiro (riz, maïs) et du calendrier de culture du Bénin (FAO, 2023). Le K_c varie également selon le climat environnant et a tendance à être plus élevé pour les climats arides. Ainsi, étant donné que le bulletin de la FAO a été élaborée pour un climat sub-humide, des valeurs plus élevées ont été choisies pour ce travail. Pour conclure, les K_c choisis sont de 1.0 pour les mois de mars à juin, 1.2 pour juillet à septembre et 0.9 pour octobre à décembre.

3.5.2 Bases de données

Aujourd'hui, la surveillance des précipitations dans le monde est d'une importance capitale. Elle fournit des informations vitales dans les domaines de la surveillance des inondations, de la sécheresse, de la production agricole et de la santé publique (Ollivier et al, 2023). Cette importance est intensifiée par la confrontation croissante des ressources en eau à des changements sans précédent de la distribution et de l'intensité des précipitations saisonnières en raison de la variabilité climatique. Le suivi précis des précipitations permet d'aider à détecter et à quantifier ces changements (Satgé et al, 2020).

Les réseaux de pluviomètres représentent la source principale de données de mesures de précipitations. Cependant, un pluviomètre ne peut que fournir une mesure ponctuelle, ainsi les réseaux de pluviomètres sont rarement suffisamment denses pour pouvoir estimer avec précision l'hétérogénéité spatiale importante des précipitations (Ollivier et al, 2023). L'erreur d'échantillonnage spatial (SSE) est définie comme l'erreur qui résulte de l'approximation d'une estimation surfacique à l'aide uniquement

de mesures ponctuelles. En conséquence, les pluviomètres introduisent un décalage d'échantillonnage qui peut aller jusqu'à neuf ordres de grandeurs lorsque la zone de capture est comparée à la taille d'un pixel d'une carte de pluviométrie typique (Villarini et al, 2008).

Face à ces limitations, le développement de bases de données de précipitations, à l'aide de mesures satellitaires avec une couverture spatiale et temporelle régulière, offre une alternative prometteuse aux réseaux de pluviomètres traditionnels (Ollivier et al, 2023). Cette option est particulièrement attractive en Afrique où la rareté des stations météorologiques globales par rapport à d'autres régions pose un problème pour la couverture et la distribution des données. De plus, une amélioration partielle de la disponibilité et de l'accessibilité des données hydrologiques a été observée en Afrique suite à l'adoption de données satellitaires (Dube et al, 2023).

La même situation est observée pour l'estimation de l'évapotranspiration à grande échelle qui est une opération hautement difficile qui requiert une station météorologique nécessitant une maintenance importante. Additionnellement, dans ce cas, les satellites peuvent effectuer des mesures impossibles pour la station météorologique en place. Notamment, la mesure des flux de chaleur sensible et latente requiert une station d'Eddy Covariance (Vanclooster, 2023) dont la commune de Glazoué ne dispose pas.

Le logiciel Google Earth Engine met à la disposition du public de nombreuses bases de données climatiques satellitaires. Dans le cadre de ce travail, cinq d'entre elles ont été utilisées à fin de les comparer aux valeurs mesurées sur le terrain. Ces bases de données ont été choisies en fonction de leur pertinence (données journalières nécessaires pour l'année 2021) ainsi qu'en fonction de leur crédibilité (utilisation actuelle dans la recherche).

Précipitation

CHIRPS

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) est une base de données pluviométriques journalières couvrant presque la totalité de la terre et dont les premières données remontent à 1981. CHIRPS intègre des images satellites à haute résolution ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$) avec des données de stations in situ pour créer des séries chronologiques de précipitations avec une période de latence de trois semaines pour les utilisateurs hydrométéorologiques. Pour ce calcul, plusieurs réseaux importants de pluviomètres au sol sont utilisés et l'intégration est effectuée avec un algorithme modifié de pondération de distance inverse. CHIRPS requiert également l'utilisation des estimations de Cold Cloud Duration (CCD) pour calculer les anomalies des précipitations. La méthode CCD repose sur le fait qu'il est possible de prédire si certains nuages vont produire des précipitations parce que plus le nuage est froid et épais, plus il est probable qu'il pleuve (Shen et al, 2020).

Aujourd'hui, CHIRPS est une ressource largement utilisée. Elle contribue aux activités d'alerte précoce et de surveillance hydrologiques menées par des agences telles que le Programme alimentaire mondial, la FAO ou encore le Foreign Agricultural Service (Levizzani et al, 2020).

GPM

Global Precipitation Measurement (GPM) est une mission satellitaire internationale qui a débuté en 2014 et dont l'objectif est d'améliorer les mesures des précipitations sur la Terre en comprenant leur physique et leur variabilité spatio-temporelle. Ce projet a fourni les instruments de mesure de précipitations les plus avancés actuellement en orbite : soit un radar de précipitation à double fréquence (DPR) et le GPM Microwave Imager. Les données obtenues ont une résolution horizontale de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ et une résolution temporelle de 30 min (Kubota et al, 2020).

L'algorithme utilisé fusionne et interpole toutes les estimations par micro-ondes satellitaires, par satellite infra-rouge et par pluviomètres, fournissant ainsi des meilleures estimations au fur et à mesure que davantage de données sont collectées (NASA GES DISC, 2023). Aujourd'hui, la mission englobe le Core Observatory et une constellation d'environ 10 satellites venant de partenaires nationaux et internationaux (Skofronick-Jackson et al, 2017).

GSMaP

Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) est un produit de la mission GPM. Elle fournit des données de précipitations chaque heure avec une résolution horizontale de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Ces valeurs sont estimées à l'aide de radiomètres multi-bandes passifs à micro-ondes, de radiomètres infrarouges et diverses autres satellites (JAXA Earth Observation Research Center, 2023). Ce jeu de données est traité par un algorithme dont l'objectif est de trouver la précipitation optimale pour laquelle les températures de brillance calculées par un modèle de transfert radiatif correspondent le mieux aux températures de brillance observées (Aonashi et al, 2009).

Cette base de données est un mélange des trois produits GSMaP. GSMaP_NRT est une carte des précipitations mondiales en temps réel de JAXA Global Rainfall Watch. GSMaP_MVK est obtenu en utilisant une approche du filtre de Kalman qui affine le taux d'avancement des précipitations en fonction du vecteur de mouvement atmosphérique dérivé de deux images IR successives. GSMaP_Gauge ajuste l'estimation du GSMaP_MVK à l'aide d'une analyse de jauge globale fournie par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (Deng et al., 2018).

Evapotranspiration

MOD16A2

La Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD16A2 est une base de données établie par la NASA qui fournit quatre paramètres dont notamment des estimations d'évapotranspiration potentielle depuis 2000. Ces estimations ont une résolution temporelle de huit jours et une résolution spatiale de 500 mètres. Le calcul utilisé est basé sur la formule de Penman-Monteith et inclut des données de réanalyse météorologique ainsi que des observations faites par la télédétection MODIS telles que la dynamique de la végétation, l'albédo et la couverture terrestre.

Plus précisément, la base de données utilisée est la MOD16A2GF (Gap-Filled) qui n'est générée qu'à la fin de l'année, car c'est la MOD16 améliorée. En effet, les entrées de mauvaise qualité de l'indice de surface foliaire (LAI) et de la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (FPAR) ont été nettoyées. Si un pixel de LAI/FPAR ne répond pas aux critères de sélection de qualité, sa valeur est déterminée par interpolation linéaire (Running et al, 2021).

WAPOR

La FAO a développé le Water Productivity Open-access portal (WaPOR) afin de surveiller la productivité de l'eau grâce au libre accès aux données dérivées de télédétection. Ce portail offre notamment des données continues d'évapotranspiration de référence (ET₀) journalières à partir de 2009 à une résolution spatiale de 20 km (FAO, 2020).

La ET₀ ici est calculée en utilisant l'équation de Penman-Monteith (Barideh et al, 2022). Pour cela, WAPOR utilise des données météorologiques de la base de données MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) jusqu'au 21 février 2014 et du Goddard Earth Observing System (GEOS-5) après cette date (Blatchford et al, 2020).

3.5.3 Comparaison des valeurs

Afin de caractériser la proximité entre les valeurs mesurées sur le terrain et celles prédites par le modèle, de nombreuses méthodes sont utilisées. Une combinaison de résultats graphiques et de statistiques est actuellement recommandée à fin de réaliser une comparaison suffisamment approfondie (Ritter & Muñoz-Carpena, 2013).

Pour l'analyse graphique de ces données, Matplotlib a été utilisée, car c'est une des bibliothèques de visualisation de données Python les plus populaires. Construite sur des NumPy arrays, Matplotlib est flexible et est hautement compatible avec d'autres bibliothèques Python. Considérée comme l'une des bibliothèques de visualisations les plus puissantes et les plus utilisées, elle permet pratiquement

n'importe quelle visualisation scientifique bidimensionnelle (Lavanya, 2023).

Ensuite, pour l'analyse statistique, des critères d'efficacité sont utilisés pour mesurer l'écart entre les valeurs. Trois indicateurs sont repris dans ce travail : le coefficient de détermination (R^2), le coefficient NSE (Nash-Sutcliffe efficiency) et la racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques (RMSE). Ces critères ont été choisis en raison de leur efficacité et de leur popularité importante dans les études hydrologiques (Waseem et al., 2020 ; Zhou et al., 2022).

Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination (R^2) mesure la corrélation linéaire entre chaque valeur simulée et chaque valeur mesurée. R^2 a une valeur entre 0 et 1 ; plus il se rapproche de 1, plus il reflète une corrélation entre les deux jeux de données. En général, une valeur de 0,5 ou plus est considérée comme bonne (Jung et al., 2016). Ce coefficient a des limitations, car les mesures basées sur la corrélation sont sensibles aux valeurs aberrantes plutôt qu'aux valeurs proches de la moyenne. Ainsi, la présence d'une valeur aberrante peut entraîner un biais dans l'évaluation du modèle (Waseem et al., 2017). En effet, lors d'événements extrêmes, le modèle fournira des valeurs élevées de R^2 ce qui rendra confuse la relation entre les valeurs observées et prédites. Une autre limitation du coefficient est que R^2 est insensible à la sous ou surestimation systématique (Althoff & Rodrigues, 2021).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

Avec O_i , la valeur observée ; $\bar{O}$, la moyenne des valeurs observées, P_i , la valeur prédite, $\bar{P}$, la moyenne des valeurs prédites et n ($i = 1, 2, \dots, n$), la période totale de simulation (Krause et al., 2005).

Coefficient d'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe (NSE)

Cet indicateur est l'un des plus populaires, il représente la différence absolue entre les valeurs observées et prédites qui sont ensuite normalisées par la variance des valeurs observées pour éliminer tout biais. NSE a une valeur entre 1 et $-\infty$, plus il se rapproche de 1, plus l'écart entre les deux est minime. En général, une valeur supérieure à 0 est considérée comme raisonnable.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{mean}})^2} \right]$$

Avec Y^{obs} , la valeur observée; Y^{sim} , la valeur simulée; Y^{mean} , la moyenne des valeurs mesurées et n ($i = 1, 2, \dots, n$), la période totale de simulation (Jung et al., 2016).

Le numérateur montre que les petites erreurs deviendront plus petites tandis que les grandes erreurs deviendront plus grandes. Ceci est l'inconvénient principal de ce coefficient, car cela conduit à une sur-estimation ou une sous-estimation selon l'erreur dominante du modèle examiné. Additionnellement, la moyenne observée est utilisée dans le calcul de la variance pour la normalisation, ce qui résulte en une surestimation de l'efficacité d'un modèle hydrologique pour les zones très variables (Waseem et al., 2017).

Racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, RMSE) est souvent utilisée pour mesurer la performance globale d'un modèle. Si sa valeur est proche de zéro, cela tend vers une prévision parfaite, donc le modèle est bien optimisé.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

Avec X , les valeurs observées; Y , les valeurs prédites et n ($i = 1, 2, \dots, n$) (Kouassi et al., 2013).

Une limitation de cet indicateur est qu'il pénalise la variance en donnant plus de poids aux erreurs avec des grandes valeurs absolues qu'aux erreurs avec des petites valeurs absolues (Chai & Draxler, 2014).

3.6 Modélisation avec SuperFlexpy

3.6.1 Présentation de SuperflexPy

SuperflexPy est un framework Python open source qui permet le développement de modèles hydrologiques conceptuels à partir de composants génériques, avec un degré élevé de contrôle sur tous les aspects de la caractérisation du modèle. En terme de complexité spatiale, il peut être utilisé pour une large gamme de modèles, allant d'un simple modèle constitué d'un seul réservoir à de grandes configurations distribuées dans l'espace. SuperflexPy est disponible pour le public sous forme de code open source. Ce framework a été choisi dans le cadre de ce travail, car il est de type « flexible », c'est-à-dire qu'il peut créer des modèles avec des structures adaptées à des emplacements et/ou des conditions environnementales spécifiques. De plus, sa flexibilité lui permet de tester des hypothèses systématiques et détaillées.

La création de modèles en utilisant SuperflexPy est basée sur l'utilisation de simples blocs de construction appelés « éléments ». Ils sont divisés en trois catégories et sont connectés de diverses manières possibles pour composer la structure du modèle souhaité. Ils peuvent représenter tout un bassin versant entier ou simplement un processus hydrologique spécifique au sein d'un bassin versant.

Le premier élément est appelé l'élément réservoir et permet de caractériser les procédés qui impliquent le stockage et l'évacuation d'eau ainsi que d'autres flux. Il peut être décrit mathématiquement à l'aide d'équations différentielles ordinaires. Le deuxième est l'élément fonction de retard. Cet élément est utilisé pour appliquer un retard à la progression d'un flux, il est décrit mathématiquement avec une intégrale de convolution. Le troisième est l'élément connexion et permet de connecter deux autres éléments, par exemple quand plusieurs flux doivent être agrégés ou, inversement, quand un flux doit être réparti entre plusieurs éléments en aval (Dal Molin et al, 2021).

L'élément réservoir est l'élément le plus utilisé dans les modèles conceptuels hydrologiques. Il existe de nombreuses différentes implémentations de réservoirs, dont huit sont actuellement intégrées dans le framework (Dal Molin et al, 2021). Ceux-ci sont :

- Interception Filter. Ce filtre est utilisé entre autres dans le modèle GR4J pour simuler l'interception. Ses entrées sont le débit arrivant (la précipitation ou le flux de sortie du réservoir précédent) et l'évapotranspiration potentielle.
- Linear Reservoir. Ce réservoir suppose une relation stockage-écoulement très simple et linéaire. Il est utilisé dans le modèle HYMOD pour simuler le routage et les processus de stockage de la zone inférieure. Sa seule entrée est le débit arrivant.
- Power Reservoir. Ce réservoir suppose que la relation stockage-écoulement est décrite par une fonction puissance. Ce type de réservoir est utilisé dans la famille de modèles HBV pour représenter la réponse rapide d'un bassin versant. Sa seule entrée est le débit arrivant.
- Production Store. Ce magasin est utilisé dans le modèle GR4J pour simuler la production de ruissellement. Ses entrées sont le débit arrivant et l'évapotranspiration potentielle.
- Routing Store. Ce magasin est utilisé dans le modèle GR4J pour simuler le routage. Sa seule entrée est le débit arrivant.
- Snow Reservoir. Ce réservoir est utilisé pour simuler les processus de la neige en fonction de la température. Ses entrées sont le débit arrivant et la température.
- Unsaturated Reservoir. Ce réservoir spécifie l'évapotranspiration réelle comme une fonction de seuil du stockage, en combinaison avec la relation stockage-écoulement qui est fixée à une fonction de puissance. Il est utilisé pour représenter la dynamique des sols non saturés. Ses entrées sont le débit arrivant et l'évapotranspiration potentielle.
- UpperZone. Ce réservoir est utilisé dans le modèle HYMOD pour simuler la zone supérieure du sol. Ses entrées sont le débit arrivant et l'évapotranspiration potentielle.

Ces réservoirs représentent donc des moyennes de divers processus du bas-fond qui contribuent à sa réponse globale à un évènement pluvieux. Les paramètres de ces réservoirs définissent leur comportement, ce sont des représentations conceptuelles des caractéristiques abstraites du bas-fond (Fenicia et al., 2007).

3.6.2 Analyse et validation de la modélisation

Un modèle hydrologique est généralement caractérisé par divers paramètres dont le nombre augmente avec la complexité du modèle. Les valeurs de ces paramètres peuvent être difficiles à déterminer avec précision en raison notamment de la variabilité spatiale, du manque d'informations et de l'erreur de mesure. En conséquence, afin de représenter au mieux la réalité, un conditionnement du modèle est nécessaire en optimisant les paramètres internes. Ce processus d'étalonnage peut être manuel ou automatique. Mais, dans les deux cas, une analyse de sensibilité est pertinente à effectuer au préalable. Cette étape permet d'indiquer quels paramètres contribuent le plus à la variation des données de sortie en fonction de la variabilité des données d'entrée. Ensuite, sur base de ces connaissances, l'étalonnage peut être effectué sur les paramètres les plus influençant.

Dans le cadre de ce travail, la sensibilité est exprimée par un indice sans dimension I , qui est calculé comme le rapport entre la variation relative des résultats du modèle et la variation relative d'un paramètre. En modifiant un à la fois chaque paramètre d'entrée tout en gardant tous les autres constants, la sensibilité du réservoir à ce paramètre peut être identifiée (Lenhart et al, 2002).

$$I = \frac{(y_2 - y_1)/y_0}{[(x_0 - x_1) + (x_2 - x_0)]/x_0}$$

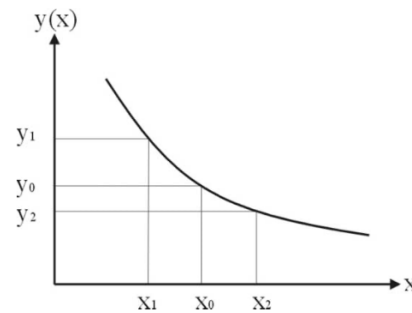


FIGURE 15 – Relation entre une variable de sortie y et un paramètre x

Avec x_0 , le paramètre initial ; x_1 , une valeur inférieure du paramètre ; x_2 , une valeur supérieure du paramètre ; y_0 , le résultat simulé initial ; y_1 , le résultat simulé obtenu avec x_1 ; y_2 , le résultat simulé obtenu avec x_2 (cf. figure 15).

Le tableau 1 permet d'identifier l'intensité de cette sensibilité.

Classe	Indice	Sensibilité
I	$0.00 \leq I < 0.05$	Petit à négligeable
I	$0.05 \leq I < 0.20$	Moyen
I	$0.20 \leq I < 1.00$	Elevé
I	$ I \geq 1.00$	Très élevé

TABLE 1 – Classes de sensibilité

Ensuite, l'étalonnage peut être effectué. Ce processus d'étalonnage n'est pas intégré dans le framework utilisé. L'étalonnage automatique étant beaucoup plus intéressant, tant en efficacité qu'en rapidité, une recherche extensive a été réalisée pour trouver une manière d'intégrer dans Superflexpy un code python permettant d'automatiser le processus. De nombreux essais ont été réalisés, mais malheureusement sans succès. Ainsi, par défaut, la méthode d'étalonnage manuelle a été choisie. Celle-ci consiste en un ajustement « à la main » des valeurs des paramètres par essai et erreur jusqu'à ce que le comportement simulé du bas-fond soit proche du comportement observé. L'analyse de la proximité de ces valeurs est effectuée à l'aide des trois critères de performance R^2 , NSE et RMSE (Fenicia et al, 2007).

Pour terminer, une validation du modèle est réalisée. Celle-ci est faite à l'aide de nouvelles estimations de débits, différentes de celles utilisées pour l'étalonnage. Les mêmes critères d'efficacité sont à nouveau utilisés pour évaluer la capacité de simulation du modèle.

4 Résultats et discussion

4.1 Données observées

La figure 16 montre les trois groupes de données mesurées sur le terrain et utilisées dans le cadre de ce travail. Le premier graphique reprend la précipitation et l'évapotranspiration potentielle et le deuxième graphique présente le débit à l'exutoire. Ces données sont disponibles à partir du 03/03/2021 jusqu'au 31/12/2021, ainsi toute la saison humide est prise en compte.

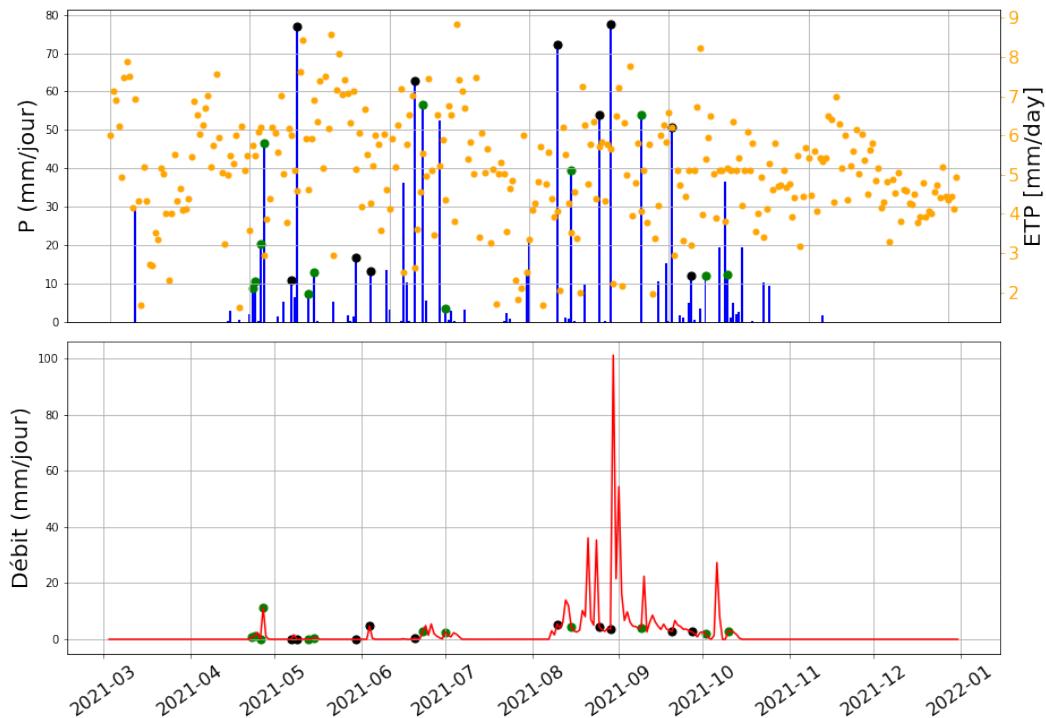


FIGURE 16 – Précipitation, ET0 et débit mesurés en 2021

Dans cette figure, les valeurs sont agrégées par jour, mais, la simulation du débit a été effectuée à l'échelle événementiel à fin de mieux appréhender la capacité du modèle à prédire le débit. Pour choisir quels événements observer, un filtre a été appliqué à l'ensemble des données de précipitation. En conséquence, seuls les événements de plus de 2,5 mm d'eau et séparés de moins de six heures ont été gardés. Ensuite, la relation entre la précipitation et le débit a été déterminée en calculant le coefficient de corrélation linéaire.

Mesurer la corrélation entre la précipitation et le débit observé dans le bas-fond est crucial, car cela permet d'évaluer la qualité des données. Cependant, le décalage entre ces deux valeurs doit d'abord être déterminé. Celui-ci représente le temps de réponse du bas-fond à l'événement de pluie. Le calcul précis de ce décalage permet d'optimiser la corrélation. Si aucune corrélation n'est trouvée, même en prenant en compte l'effet du décalage, alors une simulation du débit est impossible.

Plus précisément, le temps de réponse du bas-fond, aussi appelé temps de concentration, représente le temps que met une goutte d'eau de pluie pour arriver à la section d'exutoire à partir du point le plus éloigné. Il y a diverses manières de calculer avec précision cette valeur à l'aide des caractéristiques physiques du bas-fond, car avec le temps de nombreuses équations ont été développées par différents chercheurs. Dans le cadre de ce travail, afin d'être exhaustive, la moyenne des trois équations ci-dessous est prise, ce sont les équations de Haktanir and Sezen (1990) utilisées par Perdikaris et al (2018), la méthode USBR (1973) utilisée par Gericke & Smithers (2014) et la méthode du Department of Public Works (1995) utilisée par Grimaldi et al (2012). Ces équations ont été choisies en fonction de leur pertinence pour le bas-fond d'étude, en effet, ces formules sont généralement développées par les chercheurs pour des bassins avec des tailles et des pentes précises.

$$T_c = 0,734L^{0,841} \qquad T_c = \left(\frac{0,87L^2}{1000P}\right)^{0,385}(2 - 0,5\log S) \qquad T_c = 60\left(\frac{11,9L^3}{H}\right)^{0,385}$$

Avec T_c , le temps de concentration [min] ; L, la longueur de l'axe d'écoulement principal [km] ; P, la pente de l'axe d'écoulement principal [m/m] ; S, la superficie total [km^2] ; H, la différence d'élévation maximale dans le bas-fond [m].

Cela donne un temps de réponse de 51,93 minutes. En appliquant le filtre repris ci-dessus, 22 événements ont été identifiés sur les 304 jours de données. Ceux-ci sont observables dans la figure 16. Les points verts représentent les 12 événements considérés comme intéressants, car ils ont une corrélation au-dessus de 0,24 ce qui veut dire qu'il existe une relation moyenne entre les deux ensembles de données (Corroyer & Rouanet, 1994). Les points noirs sont ceux qui, même en prenant en compte l'effet du décalage, ont une corrélation inférieure à 0,24, ce qui indique que la simulation n'est pas possible.

La majorité des événements d'intérêts se déroulent durant la première saison humide. À partir du mois d'août, une plus faible relation entre la précipitation et le débit a été mesurée, surtout pour les événements importants. Cette absence de corrélation pourrait être le résultat d'un sol très saturé qui produit beaucoup de ruissellement même en absence de précipitation.

Ci-dessous sont repris cinq des 12 événements d'intérêts, soit ceux avec la meilleure corrélation, les autres sont repris en Annexe 1. Afin de montrer graphiquement l'effet du temps de réponse, celui-ci est arrondi à 45 minutes étant donné que les valeurs ont un pas de temps de 15 minutes.

Pour commencer, la figure 17 présente l'événement numéro 2 de pluie analysé et la réponse de débit suscitée. Dans la figure 18, le décalage entre les deux a été supprimé, ainsi le temps de réponse du débit est considéré comme nul. Cela permet à la corrélation entre les deux de passer de 0,11 à 0,69 (cf. Annexe 2).

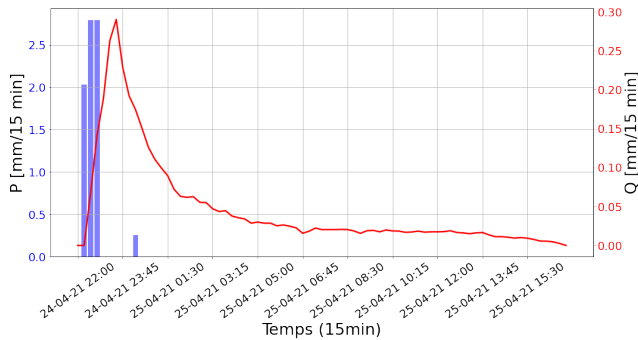


FIGURE 17 – Précipitation et débit événement 2
avant décalage

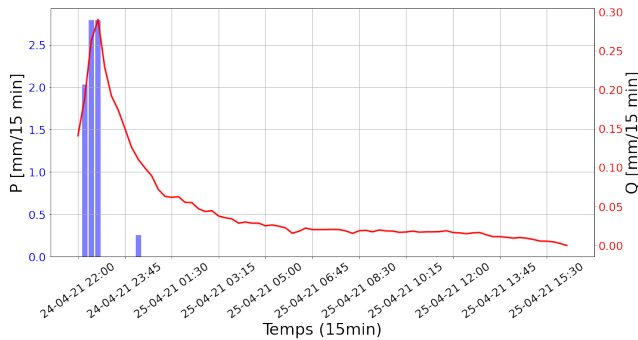


FIGURE 18 – Précipitation et débit événement 2
après décalage

Les figures 19 et 20 reprennent un autre événement semblable, mais cette fois avec un volume plus élevé. La corrélation est de 0,28 et devient 0,71 avec le recul du débit.

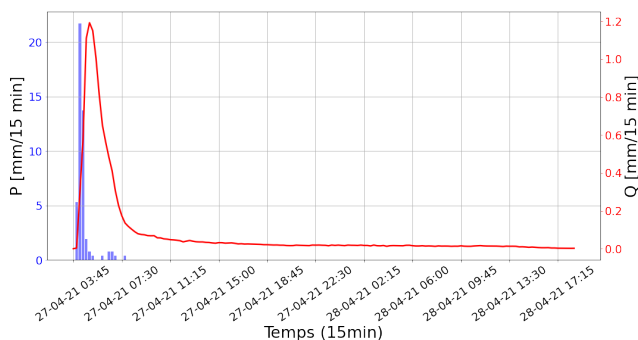


FIGURE 19 – Précipitation et débit événement 4
avant décalage

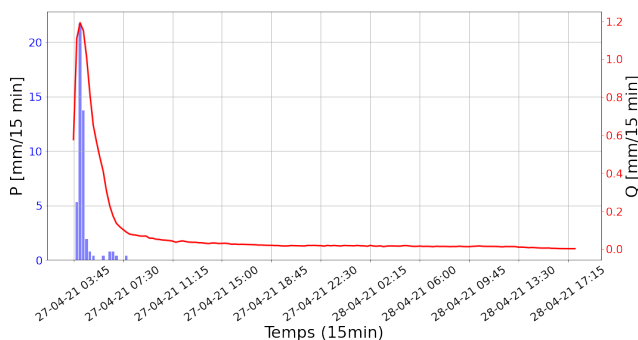


FIGURE 20 – Précipitation et débit événement 4
après décalage

Pour les figures 21 et 22, le débit de sortie est graduel, indiquant que le ruissellement du bas-fond est ralenti. La corrélation passe de -0,08 à 0,53.

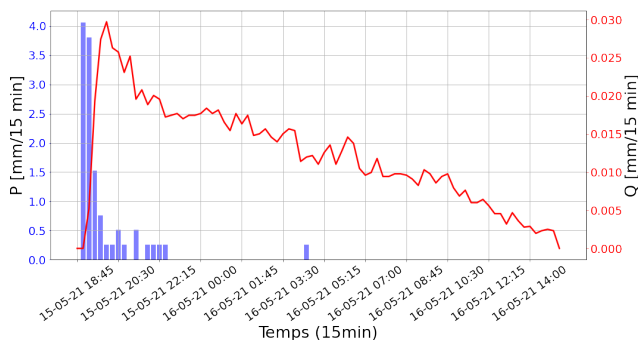


FIGURE 21 – Précipitation et débit événement 8
avant décalage

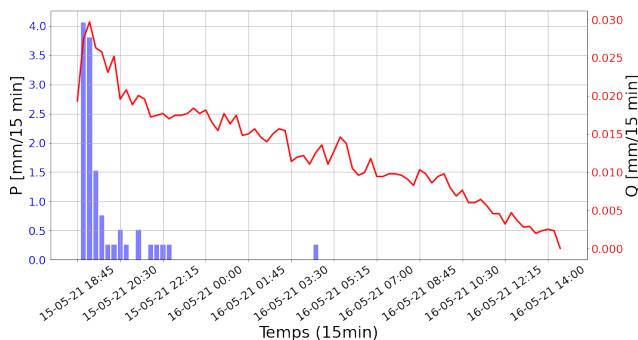


FIGURE 22 – Précipitation et débit événement 8
après décalage

Pour l'événement 12 (cf. figures 23 et 24), de l'eau est mesurée à l'exutoire avant l'arrivée des précipitations et pendant plus de deux jours après. Ainsi, cela montre la saturation significative du bas-fond à ce moment-là. Avec un temps de réponse nul, la corrélation passe de 0,29 à 0,61.

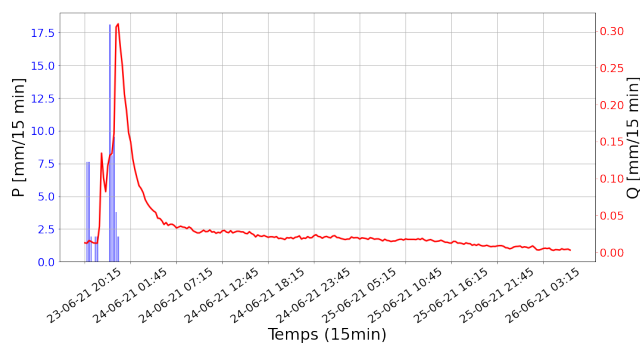


FIGURE 23 – Précipitation et débit événement 12 avant décalage

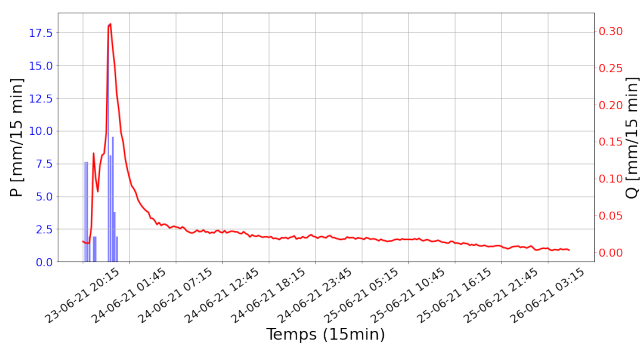


FIGURE 24 – Précipitation et débit événement 12 après décalage

Enfin, pour l'événement 15, les figures 25 et 26 montrent une présence importante de débit avant l'événement de précipitation. La relation entre la pluie observée et le débit est moins claire. La prise en compte du temps de concentration n'a qu'un faible effet avec la corrélation qui passe de 0,52 à 0,56.

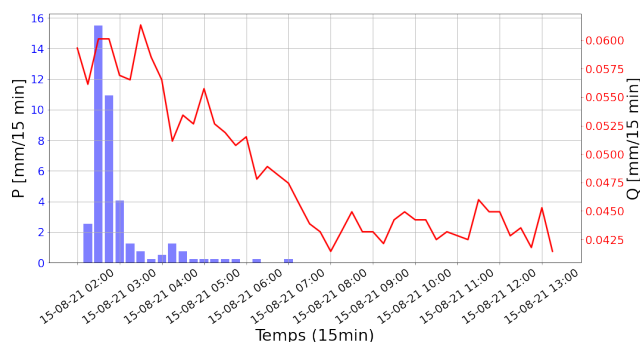


FIGURE 25 – Précipitation et débit événement 15 avant décalage

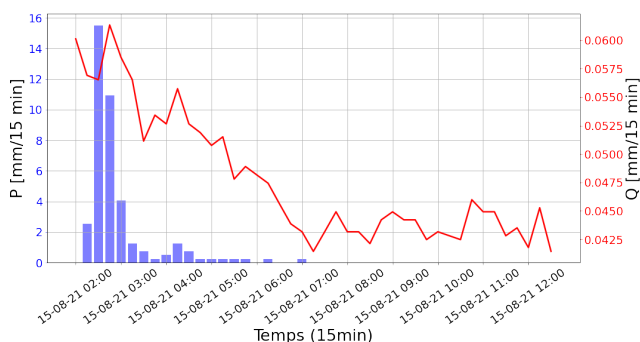


FIGURE 26 – Précipitation et débit événement 15 après décalage

Pour les autres événements (repris en Annexe 1), le 1 et le 18 ont des corrélations moyennes de 0,41 et 0,47 respectivement, lorsque le temps de réponse est nul. Les événements 3, 7, 13, 21 et 22 ont des corrélations moyennes à bonnes, cependant, toutes diminuent lors de la prise en compte du temps de concentration. Ils n'ont donc pas de temps de réaction, ceci peut être dû à l'arrivée de l'eau dans un bas-fond déjà fortement saturé en eau. Cette caractéristique va rendre la simulation moins efficace, car le modèle s'attend à un certain décalage.

4.2 Résultats de la séparation du débit

La figure 27 reprend les résultats obtenus après la séparation du débit à l'aide du logiciel WHAT. Pour la méthode d'Eckhardt, une valeur de 0,5 a été choisie pour l'indice de débit de base (BFI_{max}), car elle est la plus cohérente avec les conditions de sol et d'hydrologie du bas-fond d'Itchedjiro. En effet, celui-ci est plutôt caractérisé par des cours d'eau éphémères avec des aquifères poreux, en utilisant la définition qu'un cours d'eau est considéré comme pérenne s'il est asséché pendant moins de 10% du temps (Eckhardt, 2008). Pour la méthode de Lyne & Hollick, une valeur de 0,925 a été choisie pour

le paramètre du filtre (β), car elle est considérée comme la plus appropriée selon Nathan & McMahon (1990).

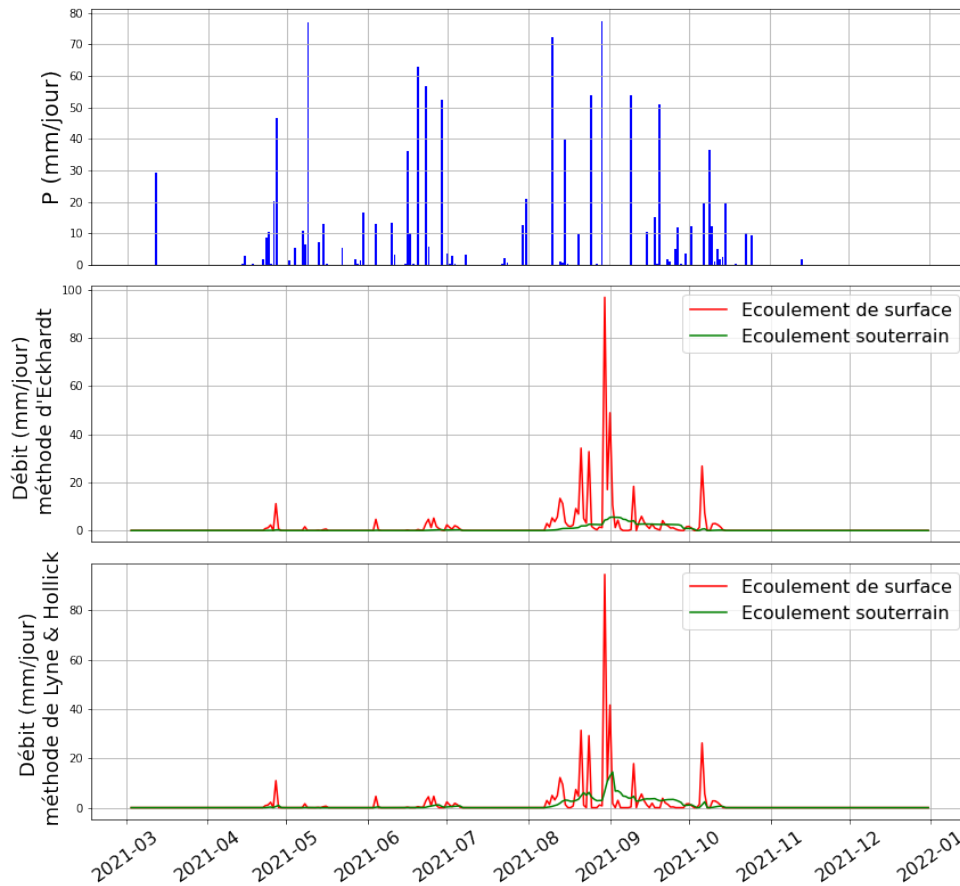


FIGURE 27 – Précipitation et débit séparé selon les deux méthodes décrites

Ces résultats montrent que durant la première saison de pluie (mars à juillet) la vaste majorité de l'écoulement observé dans le bas-fond est un écoulement de surface. Ainsi, l'infiltration profonde de l'eau et les échanges avec la nappe phréatique sont peu significatifs. C'est lors de la petite saison sèche (août à septembre) que l'écoulement souterrain devient élevé. Pour les résultats de la méthode d'Eckhardt, étant donné le choix de BFI_{max} cela veut dire qu'au maximum l'écoulement souterrain représente la moitié de l'écoulement total (Xie et al, 2020). Pour la méthode de Lyne & Hollick, l'écoulement souterrain est significativement plus important.

Cette information est particulièrement pertinente lors du choix du modèle à utiliser pour la simulation du débit ainsi que lors de l'optimisation de ses paramètres. En effet, pour la première saison de pluie, un modèle avec peu d'échanges d'eau souterraine sera plus efficace pour représenter le comportement du bas-fond. Cependant, pour les mois de juillet et août, les écoulements souterrains jouent un rôle important, parfois bien au-dessus de l'écoulement de surface.

4.3 Résultats de la critique des données d'entrée

Étant donné les limitations liées aux mesures faites sur le terrain, leur pertinence est analysée en effectuant la comparaison entre ces estimations et celles issues des bases de données génériques.

4.3.1 Précipitation

CHIRPS

La figure 28 compare la précipitation mesurée sur le site d'Itchedjiro, agrégée par jour, à celle reprise dans la base de donnée CHIRPS. La corrélation entre ces valeurs est de 0,15 (*cf.* Annexe 3) ce qui indique qu'il existe une faible relation linéaire entre elles (Corroyer & Rouanet, 1994).

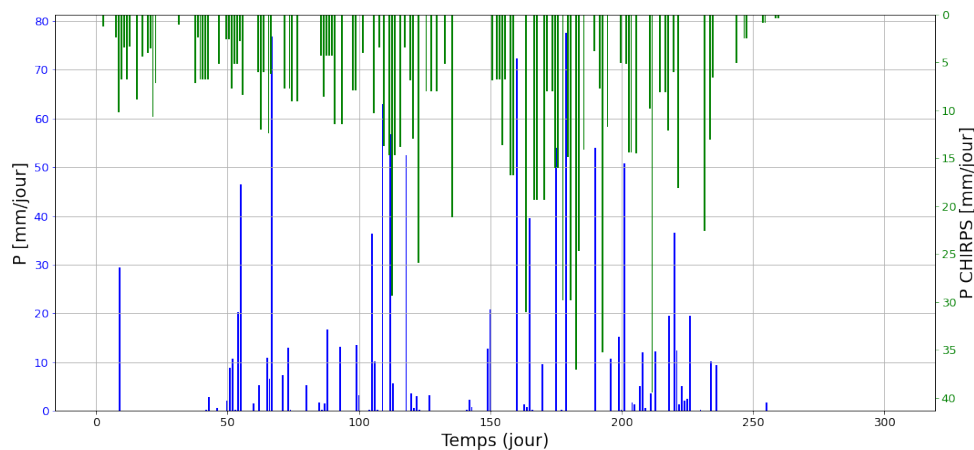


FIGURE 28 – Comparaison P et P CHIRPS

L'analyse de la base de données par Levizzani et al (2020) a révélé que les moyennes de CHIRPS sont en général très proches des données observées par les stations. Cependant, les faibles valeurs de précipitations ont tendance à être sous-estimées alors que les valeurs élevées ont tendance à être surestimées (Levizzani et al, 2020).

GPM

La comparaison à la base de données GPM est reprise dans la figure 29. Ici, les valeurs mesurées sur le terrain ont été agrégées par 30 min. La corrélation observée est de 0,08 (*cf.* Annexe 3).

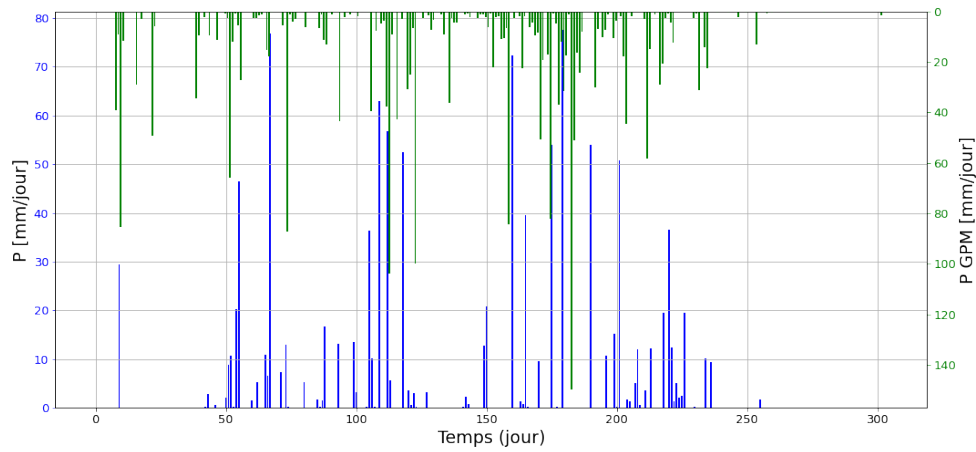


FIGURE 29 – Comparaison P et P GPM

La mission GPM est sans précédent et fournit des données sur les précipitations mondiales très utiles. Cependant, elle a également des limitations. Zhang et al (2020) ont déterminé que GPM sous-estimait le taux de précipitations légères de 6,4%, le taux de précipitations fortes de 22,8% et surestimait le taux de pluie moyenne de 29,1%.

GSMaP

Pour finir, la figure 30 montre les résultats obtenus avec la base de données GSMaP. À nouveau, la corrélation est de 0,08 (cf. Annexe 3) indiquant qu'aucune proximité entre les estimations est observable. Une agrégation a été effectuée pour obtenir des valeurs par heure.

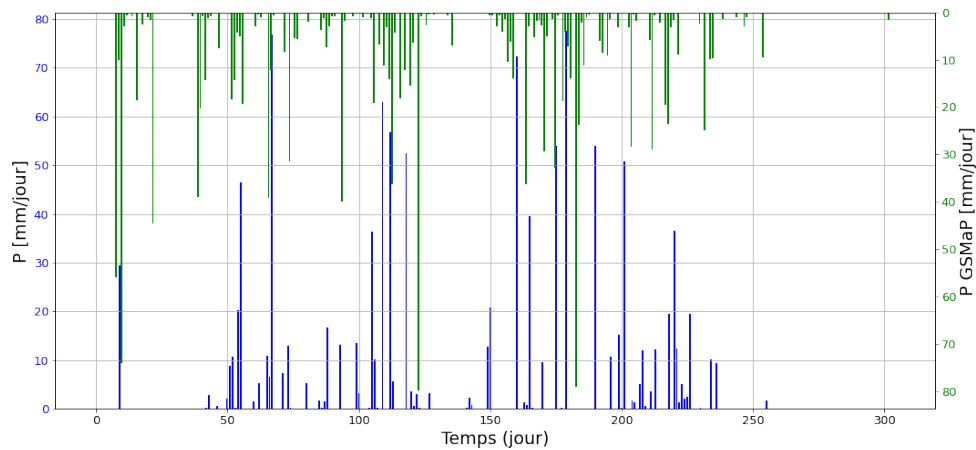


FIGURE 30 – Comparaison P et P GSMaP

GSMaP a tendance à surestimer les événements pluvieux de plus de 10mm/j, tout en sous-estimant les événements pluvieux de >35mm/j (Deng et al., 2018).

4.3.2 Évapotranspiration potentielle

Ensuite, la même comparaison est effectuée, mais cette fois avec les valeurs d'évapotranspiration des deux bases de données satellitaires décrites précédemment.

MOD16A2

La figure 31 compare les valeurs d'évapotranspiration potentielle de la base de données MOD16A2 aux valeurs d'évapotranspiration potentielle mesurées à l'aide de la station météorologique de Glazoué et du facteur cultural approximé. La corrélation entre les deux est de 0,13 (*cf.* Annexe 3) ce qui montre une relation faible entre les valeurs.

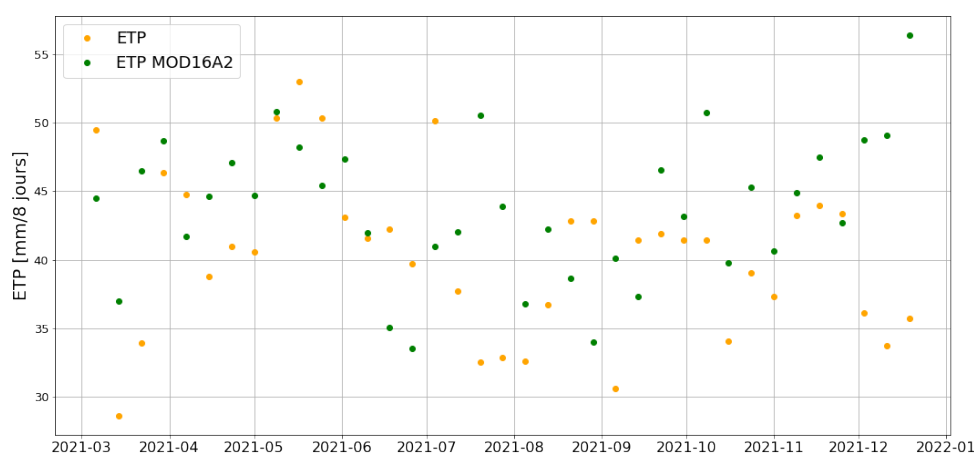


FIGURE 31 – Comparaison ETP et ETP MOD16A2

MOD16A2 donne des sommes d'estimations par huit jours, donc une agrégation a été effectuée afin d'obtenir le même pas de temps pour les deux ensembles de données. Étant donné cette petite échelle temporelle et le fait que les données disponibles commencent en mars, le nombre de mesures pour l'année n'est que de 37, ce qui n'est pas très élevé et pourrait donc diminuer la représentativité des résultats.

Les données du terrain ont été obtenues en multipliant l'ET0 calculé par un facteur K_c approximé grossièrement sur base des valeurs fournies par le bulletin 56 de la FAO et le calendrier cultural du Bénin. Ainsi, cette hypothèse peut réduire la validité de ces mesures.

WAPOR

Pour finir, une comparaison avec les valeurs d'évapotranspiration de référence de la base de données WAPOR est reprise dans la figure 32. La corrélation calculée ici est de 0,66 (*cf.* Annexe 3) ce qui indique une forte relation entre les deux. Cette figure permet de voir que les données ET0 du terrain sont beaucoup plus éparpillées que celle de la base de données WAPOR ce qui indique un manque de

précision dans la mesure de ce paramètre.

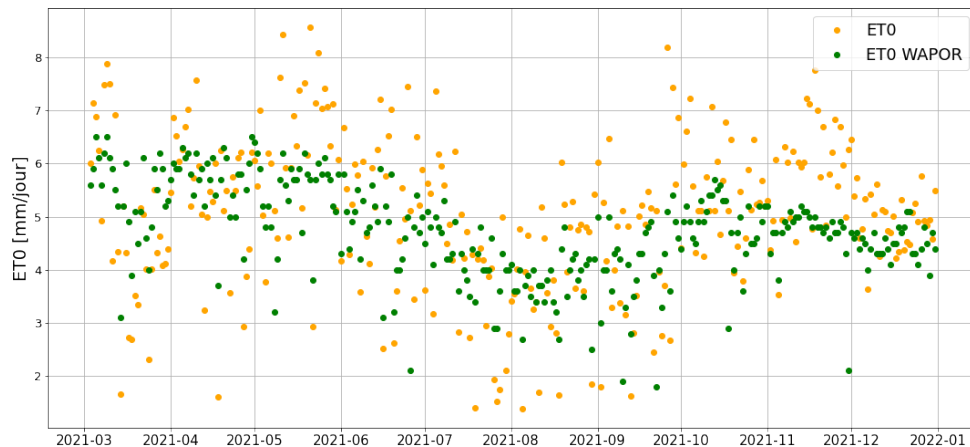


FIGURE 32 – Comparaison ET0 et ET0 WAPOR

Une surestimation générale de 15% a été observée pour la base de données WAPOR (Barideh et al, 2022).

4.3.3 Discussion des données d'entrée

À l'exception de WAPOR, ces bases de données génériques ne présentent pas de corrélation significative avec les données collectées sur le terrain. De nombreuses raisons peuvent expliquer ce résultat.

Premièrement, les estimations de pluie et d'évapotranspiration potentielle sont obtenues à l'aide d'instruments qui ont tous une certaine erreur de mesure. De plus, ceux-ci sont disposés sur le terrain et sont ainsi exposés aux éléments (vent, dépôts végétaux, animaux, chaleur), ce qui peut biaiser les résultats ainsi qu'endommager l'instrument avec le temps et donc diminuer la validité de ces mesures. D'autres sources d'erreurs sont la présence de défauts dans les instruments, les calculs nécessaires pour la détermination de l'ET0 et l'ETP et le traitement général des mesures. Également, les données collectées sur le terrain ont été mesurées uniquement à un point localisé, ce qui limite la comparaison possible avec les données satellitaires qui analysent toute la zone.

Deuxièmement, malgré la forte popularité actuelle des bases de données satellitaires en hydrologie, celles-ci ne sont pas toujours fiables. En effet, ces ensembles de données contiennent des incertitudes, leurs performances sont affectées par la saison, la latitude et les conditions météorologiques. Des défauts dans les capteurs peuvent également être des sources d'erreur (Ollivier et al, 2023).

4.4 Résultats de la modélisation

Les modèles conceptuels utilisés dans le cadre de ce travail sont créés par une association des réservoirs intégrés dans Superflexpy. Un étalonnage manuel est effectué afin que ceux-ci représentent au mieux les différentes caractéristiques du bas-fond qui influencent l'avancement de l'eau tel que la végétation, la pente, la porosité ou encore le type de sol. Mais tout d'abord, une analyse de sensibilité des paramètres de ces réservoirs est nécessaire en simulant un évènement pluvieux aléatoire de 50 mm (cf. Annexe 4). Le Snow Reservoir est omis de cette analyse, car celui-ci n'est pas pertinent pour ce travail étant donné la zone climatique dans laquelle se trouve le bas-fond d'Itchedjiro.

4.4.1 Analyse de la sensibilité

Linear Reservoir

Retrouvé dans le modèle HYMOD, les activités du réservoir linéaire sont déterminées par deux équations : l'équation du débit (Q) et l'équation du bilan hydrique (dS/dt) (Lázaro et al, 2015).

$$\frac{dS}{dt} = P - Q \quad Q = kS$$

C'est un cas particulier d'un modèle de système hydrologique général qui est caractérisé par une relation linéaire entre le stockage et la sortie avec comme seul paramètre, une constante k (Ramírez, 2000).

Paramètres	x_0	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	Indice	Sensibilité
k	0,1	0,01	1,2	4,55	0,49	27,3	0,49	Elevé

TABLE 2 – Analyse de sensibilité du Linear Reservoir

La table 2 quantifie l'influence de la modification de la valeur du paramètre k sur le débit de sortie du réservoir à l'aide du calcul de l'intensité de la sensibilité. x_0 représente la valeur de départ par défaut de k , fourni par les créateurs du framework SuperflexPy. x_1 et x_2 sont les bornes des valeurs de k (Quan et al, 2015). y_0 , y_1 et y_2 sont les valeurs de débit simulées pour chacune de ces valeurs de k . L'indice de sensibilité calculé ici indique que la sensibilité est élevée, ainsi le débit réagit fortement lorsque la valeur de k est changé, ceci est cohérent étant donné que la relation débit/stockage est décrite comme linéaire.

Power Reservoir

Ce réservoir, comme le précédent, est déterminé par les deux mêmes types d'équations, mais cette fois-ci un deuxième paramètre est rajouté, α , qui est un exposant lié au stockage. Ce réservoir est repris

dans le modèle M4. Les bornes des valeurs de k sont fournies par Dal Molin et al (2020) et celle de α par Osuch et al (2015). La plage de variabilité de k est ici beaucoup plus grande que celle pour le Linear Reservoir, ceci peut être dû au fait que le Power Reservoir a deux paramètres et α est un exposant.

$$\frac{dS}{dt} = P - Q \quad Q = kS^\alpha$$

Paramètres	x_0	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	Indice	Sensibilité
k	0,01	0,00001	10	0,49	0,0005	45,45	0,092	Moyen
α	1	0,1	1	0,49	0,015	0,49	1,1	Très élevé

TABLE 3 – Analyse de sensibilité du Power Reservoir

La table 3 montre que la modification du paramètre k a un effet moyen sur la variation du débit. Par contre, pour le paramètre α l'effet est très élevé. Ces deux paramètres pourraient permettre de caractériser un élément du bas-fond qui a tendance à augmenter le ruissellement de l'eau.

Production Store

Ce réservoir, retrouvé dans le modèle GR4J, représente la zone du sol qui retient l'eau infiltrée, de plus il permet une perte d'eau par évapotranspiration (Jukić & Denić-Jukić, 2009). Son paramètre est x_1 , la capacité maximale d'humidité du sol dont la plage de variabilité (x_1 et x_2) est fournie par Shin & Yung (2022). Les autres paramètres sont fixés ; α , un exposant qui influence les équations d'évapotranspiration et d'entrée principale de valeur 2 ; β , un exposant qui influence l'équation de sortie de valeur 5 et ν , un coefficient qui influence également l'équation de sortie de valeur 4/9 (Santos et al, 2018).

$$\frac{dS}{dt} = P_s - ETR - Q_{perc} = P(1 - (\frac{S}{x_1})^\alpha) - ETP(2\frac{S}{x_1} - (\frac{S}{x_1})^\alpha) - \frac{x_1^{1-\beta}}{(\beta-1)}\nu^{\beta-1}S^\beta$$

Paramètres	x_0	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	Indice	Sensibilité
x_1	50	50	5000	16,9	16,9	0,005	-0,01	Petit à négligeable

TABLE 4 – Analyse de sensibilité du Production Store

La table 4 montre que l'accroissement de x_1 a un petit effet réducteur sur le débit de sortie. Ce paramètre peut donc simuler une caractéristique du bas-fond qui ralentit le ruissellement et laisse plus de temps à l'eau pour s'évaporer (par exemple la présence de végétation).

Routing Store

Repris dans le modèle GR4J, ce réservoir d'acheminement contribue à la rétention des eaux percolées et à la répartition latérale de la recharge des eaux souterraines en ruissellement interne et en infiltration (Jukić & Denić-Jukić, 2009). La fonction F permet de simuler les imports et les exports d'eau avec le réservoir souterrain. Les bornes des deux paramètres x_2 et x_3 sont fournies par Shin & Yung (2022). Les paramètres fixés sont ; γ , un exposant dans l'équation de ruissellement de valeur 5 et ω , un exposant dans l'équation de la fonction d'échange d'eau de valeur 3,5 (Santos et al, 2018).

$$\frac{dS}{dt} = P - Q - F = P - \frac{x_3^{1-\gamma}}{(\gamma-1)} S^\gamma - \frac{x_2}{x_3^\omega} S^\omega$$

Paramètres	x_0	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	Indice	Sensibilité
x_2	0,1	-15	4	22,7	218,5	15,8	-0,047	Petit à négligeable
x_3	20	15	1300	22,7	27,3	0,00003	-0,02	Petit à négligeable

TABLE 5 – Analyse de sensibilité du Routing Store

x_2 est un coefficient d'échange qui permet de simuler le besoin en eau du souterrain, la table 5 montre que son augmentation a un petit effet de diminution sur le débit du ruissellement. x_3 , qui est la capacité maximale de routage, a un effet similaire.

Unsaturated Reservoir

Retrouvé dans le modèle M4, ce réservoir permet de représenter la couche insaturée du sol avec comme flux de sorties l'évapotranspiration actuelle et le ruissellement. Les plages de variabilité du C_e et du S_{max} sont fournies par Dal Molin et al (2020), et celles de β par Osuch et al (2015). Le paramètre fixé est m, un facteur de lissage de l'évapotranspiration de valeur 0,01 (Dal Molin et al, 2021).

$$\frac{dS}{dt} = P - ETR - Q = P - C_e ETP\left(\frac{\bar{S}^{(1+m)}}{\bar{S}+m}\right) - P(\bar{S})^\beta \quad \bar{S} = \frac{S}{S_{max}}$$

Paramètres	x_0	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	Indice	Sensibilité
C_e	1	0,1	3	16,4	18,8	11,3	-0,16	Moyen
β	2	0,05	6	16,4	43,1	8,1	-0,72	Elevé
S_{max}	50	1,2	500	16,4	43,9	0,4	-0,27	Elevé

TABLE 6 – Analyse de sensibilité du Unsaturated Reservoir

Le paramètre C_e est un multiplicateur de l'ETR, la table 6 montre qu'il a un effet moyen de diminution sur le ruissellement. β , un exposant dans l'équation du débit, et S_{max} , le stockage maximal

de cette couche insaturée du sol, ont tous les deux un effet élevé réducteur sur le débit de sortie.

Upper Zone

Ce réservoir permet de simuler les dynamiques de sol de la couche supérieure avec comme flux de sorties l'évapotranspiration réelle et le ruissellement. On retrouve ce réservoir dans le modèle HYMOD. Les bornes des deux paramètres sont fournies par Quan et al (2015).

$$\frac{dS}{dt} = P - ETR - Q = P - ETP\left(\frac{\bar{S}(1+m)}{\bar{S}+m}\right) - P(1 - (1 - \bar{S})^\beta) \quad \bar{S} = \frac{S}{S_{max}}$$

Paramètres	x_0	x_1	x_2	y_0	y_1	y_2	Indice	Sensibilité
S_{max}	50	25	100	28,1	34,1	21,1	-0,3	Elevé
β	2	0,01	2	28,1	1,05	28,15	0,97	Elevé

TABLE 7 – Analyse de sensibilité du Upper zone

La table 7 montre que la modification des valeurs de S_{max} et de β a chaque fois un effet élevé sur le débit de sortie.

4.4.2 Étalonnage

À l'aide de ces réservoirs et d'une bonne compréhension de leur sensibilité, le fonctionnement hydrologique du bas-fond d'Itchedjiro peut être simulé. Un nombre presque infini de modèles et de différentes combinaisons de réservoirs est possible. Mais, dans le cadre de ce travail, une première simulation a d'abord été effectuée à l'aide du plus simple réservoir (le Linear Reservoir) afin de mieux appréhender la réaction directe du bas-fond à une pluie. Ensuite, les trois modèles présentés ci-dessus ont été utilisés en raison de leur popularité et leur pertinence.

Pour commencer, l'étalonnage des paramètres est réalisé en utilisant un des événements de pluie analysés. Ici, le quatrième a été choisi, car c'est celui avec la plus haute corrélation.

Linear Reservoir

	k
Avant l'étalonnage	0,1
Après l'étalonnage	0,52

TABLE 8 – Etalonnage du Linear Reservoir

La table 8 montre la valeur du paramètre k du réservoir avant et après la réalisation de l'étalonnage manuel.

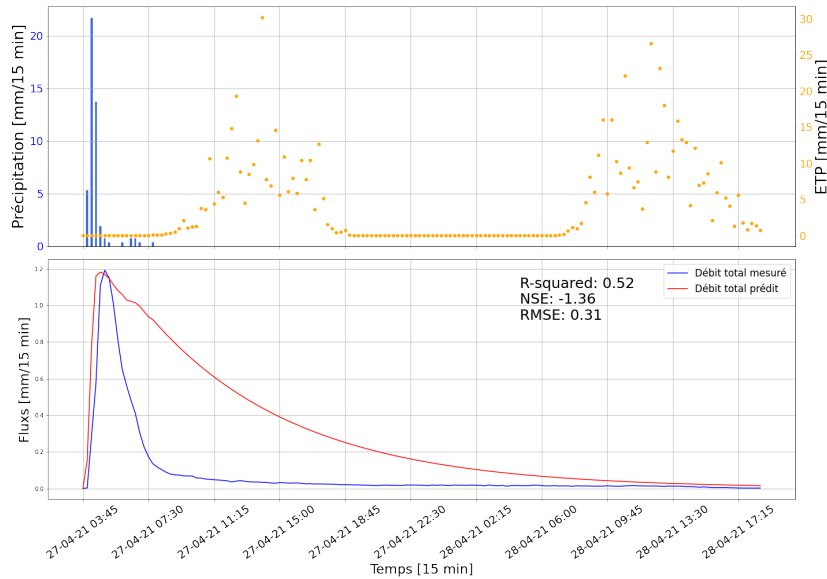


FIGURE 33 – Linear Reservoir pour événement 4

Le premier graphique de la figure 33 reprend les valeurs de précipitations et d'évapotranspiration potentielle collectées sur le terrain pour l'événement d'étude. Le deuxième graphique compare les valeurs de débits mesurées sur le site aux valeurs de débits prédites par la simulation.

Sur ce deuxième graphique, sont également présentées les valeurs des trois critères de performance appliqués pour l'étalonnage manuel des paramètres afin de quantifier la proximité des deux débits. L'utilisation de plusieurs critères est appelée un étalonnage multiobjectif. Cette méthode a été choisie, car déterminer la proximité entre des valeurs mesurées et des valeurs prédites à l'aide de trois coefficients, plutôt qu'un seul, permet d'extraire plus d'informations à partir des séries temporelles observées. Cependant, cet étalonnage multiobjectif entraîne de nombreux compromis. En effet, l'amélioration de la performance d'un paramètre pour un critère peut engendrer la dégradation de celle-ci pour un autre (Kollat et al, 2012). Néanmoins, la méthode multiobjectif a l'avantage de produire des valeurs de paramètres plus robustes que lors de l'utilisation d'un seul critère de performance (Wöhling et al, 2013).

Modèle GR4J

Ensuite, la même simulation est effectuée en utilisant le modèle GR4J.

	x_1	x_2	x_3
Avant l'étalonnage	50	0,1	20
Après l'étalonnage	30	1	18,9

TABLE 9 – Étalonnage du modèle GR4J

La table 9 montre les valeurs des trois paramètres avant et après l'étalonnage effectué. L'analyse de sensibilité des paramètres vient en aide lors de l'étalonnage manuel pour savoir quels paramètres modifier afin d'obtenir un certain résultat. Par exemple, la diminution du paramètre x_1 du Production Store ou la diminution des paramètres x_2 et x_3 du Routing Store permettent d'obtenir une augmentation du débit de ruissellement du réservoir.

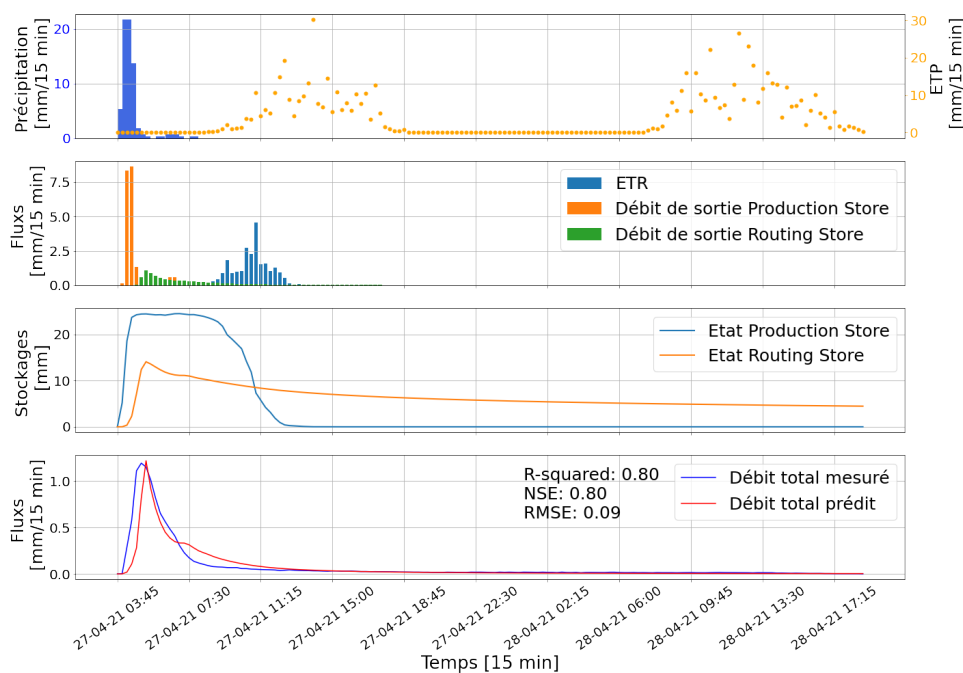


FIGURE 34 – GR4J pour événement 4

Le premier graphique de la figure 34 est semblable à celui pour le Linear Reservoir. Le deuxième graphique décrit les flux de sortie des réservoirs du modèle. Le flux de sortie de l'Interception Store n'est pas repris. Mais, les deux flux de sortie du Production Store sont représentés, le deuxième étant l'évapotranspiration réelle, ainsi que le flux de sortie du Routing Store. Pour ce modèle, l'ETR est calculée par la formule ci-dessous.

$$ETR = ETP(2\frac{S}{x_1} - (\frac{S}{x_1})^\alpha)$$

Avec les paramètres étant ceux du Production Store et S étant le niveau de stockage de celui-ci.

En conséquence, l'ETR est fortement dépendante du niveau d'eau dans le Production Store et donc est réduite à zéro très rapidement, ce qui n'est pas nécessairement représentatif de la réalité, car de l'évapotranspiration à partir du Routing Store est également possible.

Le troisième graphique présente l'évolution du niveau des stocks en eau de ces deux réservoirs. Ce graphique permet d'observer que malgré le fait que le débit de sortie du Production Store diminue rapidement après le début de l'événement, cela n'entraîne pas une réduction de l'eau stockée dans ce réservoir, en effet ce stockage reste élevé bien plus longtemps. Ceci montre qu'une partie importante de l'eau stockée dans le Production Store quittera le modèle par évapotranspiration et non par ruissellement.

Enfin, le dernier graphique compare les valeurs de débits mesurées sur le site aux valeurs de débits prédites par le modèle GR4J avec à nouveau les trois critères de performance.

Modèle HYMOD

La simulation est également réalisée pour le modèle HYMOD.

	S_{max}	β	k_q	k_s
Avant l'étalonnage	50	2	0,1	0,1
Après l'étalonnage	47	2	0,01	0,18

TABLE 10 – Etalonnage du modèle HYMOD

Les paramètres k_q et k_s représentent les temps de résidence des réservoirs à libération rapide et lente respectivement. La partie Channel Routing du modèle est composée de trois réservoirs à libération rapide et la Lower Zone d'un réservoir à libération lente.

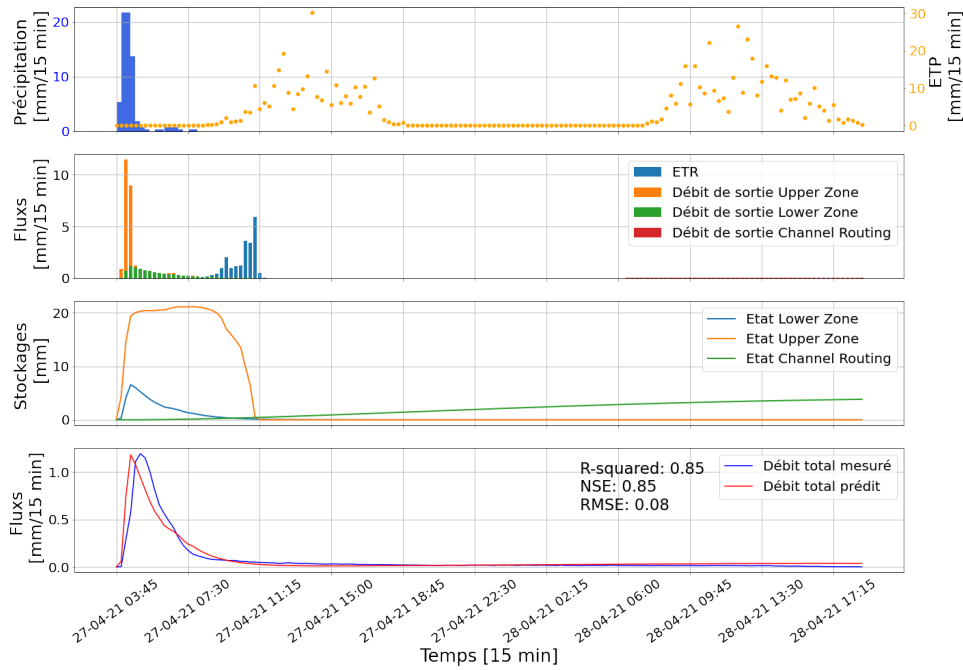


FIGURE 35 – HYMOD pour événement 4

La figure 35 est semblable à celle pour le modèle GR4J avec les deuxième et troisième graphiques qui représentent l'évolution des débits et des stockages des réservoirs du modèle. Seul le dernier des trois réservoirs du Channel Routing est repris ici. Pour ce modèle-ci, l'ETR est calculée par la formule ci-dessous.

$$ETR = ETP \left(\frac{\bar{S}(1+m)}{\bar{S}+m} \right)$$

Avec les paramètres étant ceux du réservoir Upper Zone et $\bar{S}$ étant le niveau de stockage de celui-ci divisé par son niveau maximum.

Le troisième graphique de la figure permet d'observer que le stockage dans le réservoir Upper Zone a le même comportement que celui du Production Store dans le modèle GR4J.

Modèle M4

Enfin, le modèle M4 est également repris.

	S_{max}	C_e	β	k	α
Avant l'étalonnage	50	1	2	0,1	1
Après l'étalonnage	50	1	1	0,01	1,8

TABLE 11 – Etalonnage du modèle M4

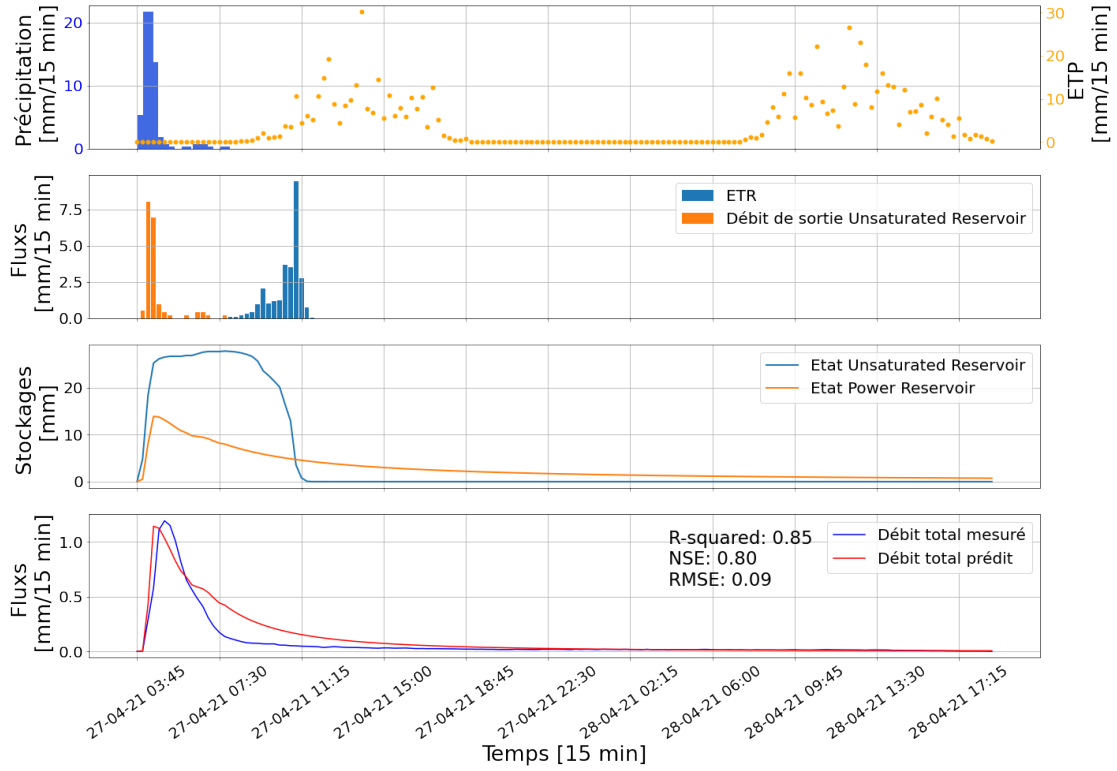


FIGURE 36 – M4 pour événement 4

Pour ce modèle, l'ETR est calculée par la formule ci-dessous.

$$ETR = C_e ETP \left(\frac{\bar{S}(1+m)}{\bar{S}+m} \right)$$

Avec les paramètres étant ceux du Unsaturated Reservoir et $\bar{S}$ étant le niveau de stockage de celui-ci divisé par son niveau maximum.

4.4.3 Validation

Une fois que les paramètres de ces différents modèles sont optimisés, la validation est effectuée afin de vérifier la capacité de ceux-ci à accomplir un objectif donné. Cette étape nécessite la comparaison entre des sorties simulées et des observations qui n'ont pas été utilisées lors de l'étalonnage du modèle (Biondi et al, 2012). Pour cela, les onzes autres événements avec une corrélation au-dessus de 0,24 ont été utilisés. Les figures 37 à 40 montrent les résultats de cette analyse de la performance pour l'événement 2. Les 10 autres sont en Annexe 5.

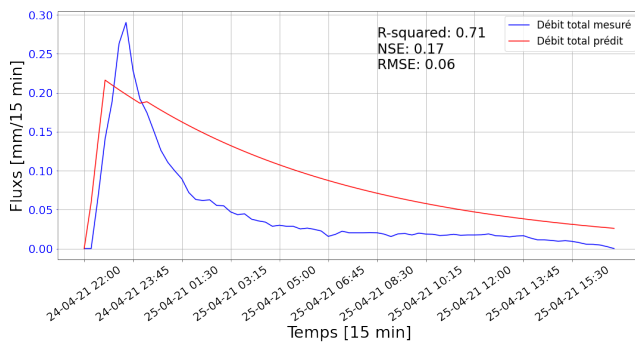


FIGURE 37 – Linear Reservoir pour événement 2

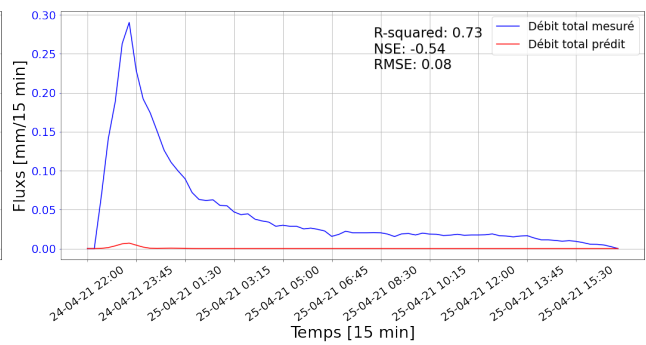


FIGURE 38 – GR4J pour événement 2

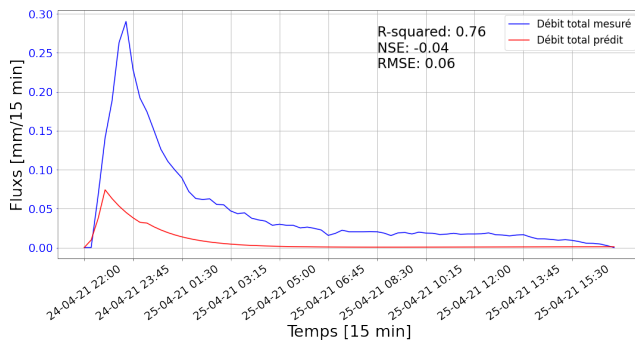


FIGURE 39 – HYMOD pour événement 2

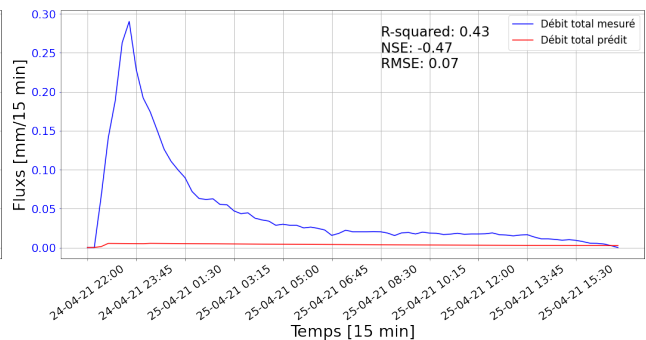


FIGURE 40 – M4 pour événement 2

4.4.4 Discussion des résultats de la modélisation

Résultats des critères de performance

Pour commencer, l'étape d'étalonnage a montré que l'utilisation du Linear Reservoir seul n'est pas très efficace en termes de simulation du ruissellement à l'exutoire. Ceci peut être dû à la simplicité trop extrême de ce modèle. En revanche, l'application des trois modèles analysés (GR4J, HYMOD et M4) à l'aide de SuperflexPy a donné des bons résultats. En effet, les résultats des critères de performance sont très satisfaisants pour chaque modèle, les meilleures valeurs ayant été obtenues avec le modèle HYMOD. Ils indiquent une forte capacité de reconstruction du modèle.

Cependant, l'étape de validation ne confirme pas cela. Pour l'événement 2, les valeurs de RMSE obtenues tendent très fortement vers zéro et sont donc tout à fait satisfaisantes. Elles sont d'ailleurs meilleures que durant l'étape d'étalonnage. Les valeurs de R^2 sont également bonnes (un peu moins pour le modèle M4). Mais les résultats du coefficient NSE sont négatives pour les trois modèles, ce qui indique une absence totale de corrélation entre les valeurs. En effet, quand le critère est aussi faible, le modèle n'apporte pas un résultat plus fiable que si l'on avait pris, à chaque pas de temps, la moyenne temporelle des observations (Ebode et al, 2021).

Pour l'événement 1, les résultats de RMSE et de R^2 sont bons, un peu moins pour le GR4J avec

un R^2 de 0,32. Mais, les valeurs de NSE sont à nouveau négatives. L'événement 7 a obtenu pour RMSE des valeurs de prévisions parfaites pour GR4J et M4. Également, une valeur de R^2 de 0,88 pour HYMOD, mais des résultats bien plus faibles pour les autres modèles. Les valeurs de NSE sont aussi négatives sauf pour M4.

Pour l'événement 8, les valeurs de RMSE sont également satisfaisantes, surtout pour le modèle M4 où on retrouve à nouveau une prévision parfaite. Les valeurs de R^2 sont majoritairement bonnes, un peu moyennes pour GR4J et HYMOD. Mais encore une fois, pour le coefficient NSE, elles sont négatives, sauf pour le modèle M4 où le résultat est bon avec 0,68. Pour l'événement 12, les résultats obtenus sont des valeurs moyennes pour RMSE (de 0,17 à 0,41), des bonnes valeurs pour R^2 (0,69 à 0,88) et des valeurs négatives pour NSE.

Pour l'événement 15, les résultats sont moins bons en général avec des valeurs moyennes de RMSE, des valeurs variées de 0,11 à 0,65 pour le R^2 et des résultats négatifs pour le NSE. Les événements 3, 18, 21 et 22 présentent des résultats relativement semblables avec des valeurs faibles pour R^2 , plutôt bonnes pour RMSE et négatives pour NSE.

Cette non-concordance importante entre les résultats des trois critères de performance peut être due à diverses raisons. En effet, ces indicateurs effectuent tous un calcul différent et ont donc des sensibilités différentes. Une raison possible est le fait que pour le NSE les différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites sont calculées sous forme de valeurs au carré, ce qui résulte en une forte surestimation des valeurs plus élevées et une sous-estimation des valeurs plus faibles. Ceci a pour effet de sous-estimer la performance du modèle en conditions de faibles débits, ce qui est le cas pour les événements observés (Krause et al, 2005).

Également, l'écart parfois très significatif entre le débit mesuré et le débit simulé peut être en partie attribué aussi à la taille des débits. En effet, certains d'entre eux sont extrêmement faibles, notamment le numéro 3 dont le débit mesuré ne dépasse pas 0,005 mm/15 min malgré le fait que l'événement de pluie atteigne jusqu'à 14 mm/15 min. Cela est certainement dû à une infiltration presque totale de la pluie dans le sol avant qu'elle atteigne l'exutoire.

Limitations de la modélisation

En conclusion, l'application des modèles hydrologiques présentés ci-dessus n'a pas permis de modéliser avec précision les 12 événements choisis. De nombreuses raisons peuvent expliquer ce résultat.

Une première faiblesse est liée aux limitations des modèles hydrologiques. Toute prédiction de débit est vulnérable à une incertitude de modélisation ainsi qu'à une incertitude prédictive. L'incertitude de modélisation est liée à la difficulté d'ajuster parfaitement un modèle à la vérité du passé.

L'incertitude prédictive provient d'erreurs d'extrapolation ou d'erreurs de prédiction temporelle dérivées du fait que le futur ressemble rarement exactement au passé (Liu & Gupta, 2007). De plus, les systèmes hydrologiques réels présentent un comportement non linéaire par rapport à différentes variables d'entrée, ainsi, leur réaction peut changer énormément pour différents scénarios. En conséquence, l'étalonnage d'un modèle avec une série de données ne garantit pas sa capacité à faire des prédictions pour d'autres conditions (Herrera et al, 2022).

Les valeurs d'entrée d'un modèle sont très incertaines. Ces valeurs sont perturbées régulièrement par divers facteurs aléatoires tels qu'un changement d'occupation du sol ou des activités agricoles. Étant donné cette incertitude, l'étalonnage d'un modèle devrait être stochastique pour prendre en compte cet aspect aléatoire. Cependant, les approches utilisées ici sont déterministes avec des critères de performance qui ne comparent que deux groupes de données (débit mesuré et simulé). Le problème est que divers paramètres très différents peuvent donner des valeurs de critères de performance fortement semblables. Ainsi, prendre un seul groupe de ces valeurs de paramètres pour représenter le bas-fond peut produire des résultats erronés (Abbaspour, 2022).

Une autre limitation possible réside dans le framework utilisé pour la modélisation. La mise en place d'un modèle avec SuperflexPy implique parfois des contraintes. Par exemple, les éléments doivent toujours former un graphe acyclique directionnel, ne permettant donc pas au modèle de contenir des boucles de rétroactions des éléments en aval vers les éléments en amont. De plus, certains facteurs ne peuvent pas être représentés. Dans le modèle GR4J, normalement la précipitation est divisée en deux flux dont un qui s'écoule dans le Production Store et l'autre qui l'évite. Dans la mise en place avec SuperflexPy, ceci n'est pas possible et les deux flux s'écoulent ensemble dans le Production Store (Dal Molin et al, 2021). Également, les modèles GR4J, HYMOD et M4 ne prennent en compte que l'évapotranspiration du premier réservoir et pas des autres. Ceci n'est pas représentatif de la réalité et peut résulter en une sous-estimation de l'ETR étant donné que l'évapotranspiration peut s'effectuer à plusieurs moments durant le cheminement de l'eau.

Enfin, une faiblesse significative de cette simulation est certainement la méthode d'étalonnage. Malgré le fait que l'étalonnage manuel puisse produire de bons résultats, il prend beaucoup de temps et implique une grande partie de jugement subjectif. En effet, un point clair qui indique la fin du processus d'étalonnage est compliqué à déterminer, ainsi différents modélisateurs obtiendront différents résultats. De plus, une analyse précise de l'incertitude de cette méthode est considérée comme étant « difficile à impossible » (Pechlivanidis et al, 2011). Cependant, étant donné la simplicité des données mesurées prises en compte lors de cette modélisation (un seul événement de pluie) un étalonnage manuel efficace semble être possible.

4.5 Modélisation annuelle

L'analyse effectuée ne permet que d'observer l'efficacité de cette modélisation à l'échelle d'un événement de pluie unique et au pas de temps de 15 min. Ceci est une bonne première étape, mais l'objectif final est de pouvoir simuler le comportement hydrologique du bas-fond sur toute une année entière. Étant donné la complexité de ce problème, celui-ci ne va pas être réalisable dans le cadre de ce travail-ci, mais une discussion sur comment atteindre cet objectif est pertinente.

Le critère le plus important à déterminer est le changement de la production de ruissellement au cours de l'année. La figure 41 montre le débit observé en fonction du cumul de précipitation. De manière logique, il est attendu qu'au début de l'année, les pluies ne génèrent que très peu de ruissellement, car le sol est très sec et donc absorbera rapidement toute l'eau qui arrive. Ensuite, au fur et à mesure que ce sol sature, les productions de débit vont augmenter. Pour finir, avec la saison de pluie qui se termine, les derniers événements de précipitation seront plus éparpillés et la présence de végétation sera importante, résultant en des ruissellements plus faibles.

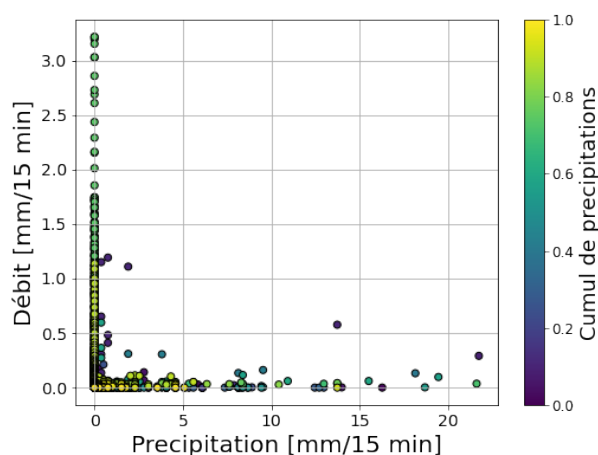


FIGURE 41 – Relation entre la précipitation et le débit sur l'année

La figure montre que la corrélation entre la précipitation et le débit sur l'année est très faible. En conséquence, la réaction attendue du bas-fond face aux précipitations est peu observable.

En conclusion, un modèle idéal qui simule le fonctionnement hydrologique du bas-fond devrait pouvoir prendre en compte la modification des conditions dans le temps. Il représenterait le fait que l'eau s'infiltre beaucoup au début de l'année et puis de moins en moins avec la saturation du sol. Ainsi, les paramètres des différents réservoirs changeraient avec la quantité de précipitation tombée. De plus, ces paramètres devraient également tenir compte d'autres caractéristiques telles que le niveau de couvert végétal au cours de l'année, étant donné son influence importante sur l'infiltration de l'eau.

4.6 Perspectives

Ce travail a fait l'objet de nombreuses incertitudes et hypothèses. Plusieurs améliorations et modifications pourraient donc être effectuées afin d'obtenir de meilleures performances et une exploration plus approfondie du sujet.

Premièrement, la quantité de données de terrain à disposition est fortement limitée. La précipitation, l'ET0 et le débit à l'exutoire sont chacun estimés à l'aide d'un seul instrument à un endroit spécifique du bas-fond. Ces mesures très localisées ne peuvent donc pas représenter adéquatement un bas-fond de 161 hectares. De plus, ces données ne sont disponibles que pour l'année 2021. En conséquence, un nombre limité d'événements de pluie est disponible pour l'analyse. L'installation d'instruments de mesure additionnels sur la zone et une continuation des observations dans le temps pourraient améliorer cette situation. Également, une détermination de l'incertitude de ces instruments de mesures est crucial, car cela permet d'évaluer le niveau de fiabilité des données récoltées sur le terrain.

Deuxièmement, la méthode d'étalonnage présente d'importantes faiblesses. Les méthodes d'étalonnage automatiques sont de plus en plus populaires : elles permettent de profiter de la vitesse et de la puissance des ordinateurs tout en restant objectives. Malheureusement, ce processus n'est pas intégré dans le framework python, ainsi l'utilisation d'un étalonnage automatique en combinaison avec SuperflexPy a été entrepris dans le cadre de ce travail, mais sans succès. Cependant, cela ne veut pas dire que cette méthode est inaccessible, une recherche plus extensive dans la matière pourrait produire de résultats intéressants. Une piste potentielle est l'utilisation de SPOTPY.

SPOTPY (Statistical Parameter Optimization Tool) est un package python à libre accès qui contient un ensemble de méthodes permettant l'étalonnage, l'analyse et l'optimisation des paramètres de diverses modèles. Il contient huit algorithmes couramment utilisés dans ce domaine dont notamment Markov-Chain Monte-Carlo (MCMC), Maximum Likelihood Estimation (MLE) et Shuffled Complex Evolution Algorithm (SCE-UA) (Houska et al, 2015).

Troisièmement, l'expérience n'a été effectuée que pour un seul bas-fond. Une fois cette simulation réalisée avec succès, l'objectif serait de la reproduire pour de nombreux autres sites. Ainsi, effectuer la même modélisation pour d'autres bas-fonds de la région serait pertinent et permettrait d'identifier le poids des limitations liées à la méthode, et celles liées à la zone. Également, seulement quatre modèles conceptuels ont été utilisés pour ce travail. Donc, reproduire la simulation à l'aide d'autres modèles hydrologiques que ceux intégrés dans SuperflexPy pourrait fournir des résultats bien différents.

De plus, les modèles utilisés dans le cadre de travail sont généralement appliqués à des bassins versants. Les bas-fonds sont des zones beaucoup plus petites que les bassins versants et ainsi ont des fonctionnements bien différents. De ce fait, SuperflexPy serait peut-être mieux adapté à la modélisation

de zones plus grandes.

Un autre point important est au niveau de la critique des données d'entrées. En effet, afin d'obtenir une analyse plus précise, celle-ci mérite d'être approfondie. Cela peut être effectué à l'aide de bases de données satellitaires additionnelles ainsi qu'en utilisant des estimations effectuées par d'autres personnes dans la région. De plus, la fusion de toutes les bases de données analysées est une option qui pourrait produire un ensemble de données amélioré sur la zone (Satgé et al, 2020). Également, observer la corrélation entre les valeurs par mois ou par saison au lieu de par an pourrait aider à déterminer si les mesures sont particulièrement compliquées à estimer durant une période précise de l'année.

Enfin, le choix du K_c présente aussi une certaine faiblesse. Sa détermination a été effectuée sur base d'hypothèses générales des types de cultures et des périodes de semis, de croissance et de récolte. Une amélioration de ce choix est possible à l'aide d'une investigation plus précise sur le terrain de ces informations ainsi qu'avec une prise d'image digitale régulière du pourcentage de couvert végétal.

5 Conclusion

Aujourd'hui, le Bénin souffre d'une forte insécurité alimentaire surtout dans les régions agricoles. Son agriculture est majoritairement pluviale et est donc fort dépendante de la fréquence et de la distribution spatiale des événements de pluie. Cela la rend également très vulnérable aux problèmes de sécheresse et aux changements climatiques. Les bas-fonds sont des vallées inondables caractérisées par une fertilité importante. Ainsi, leur mise en valeur présente un potentiel important pour améliorer la sécurité alimentaire et le développement agricole. Cependant, ceux-ci sont actuellement largement sous-utilisés, principalement en raison d'un manque d'aménagements.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet Bas-Fonds au Bénin (BAFONBE) qui a pour objectif de renforcer les connaissances sur le fonctionnement hydrologique de bas-fonds pilotes au Bénin afin de pouvoir mettre en place des aménagements hydrauliques intégrés et durables. L'objectif ultime du projet est d'améliorer la productivité agricole et la résilience des agriculteurs locaux afin d'augmenter la sécurité alimentaire de la région (Petit & Vanclooster, 2019). Ce projet est coordonné par le Earth and Life Institute (ELI) en Belgique et l'Université de Parakou au Bénin.

L'objectif général de ce mémoire se divisait en quatre sous-objectifs. Le premier était la définition spécifique du terme bas-fond et la caractérisation détaillée de la nature et du fonctionnement général de ces zones hydrologiques particulières. Pour ce faire, une recherche bibliographique a été effectuée reprenant notamment des études qui ont modélisé le fonctionnement hydrologique de bas-fonds en Afrique de l'Ouest.

Le deuxième objectif était de déterminer le comportement hydrologique du bas-fond d'Itchedjiro. Ceci a été réalisé à l'aide des instruments de mesures sur le terrain qui ont permis de déterminer la précipitation, l'évapotranspiration potentielle et le débit à l'exutoire pour l'année 2021. Ensuite, le logiciel WHAT a été utilisé à fin de déterminer le rapport écoulement de surface/écoulement souterrain dans le débit mesuré. Ceci est utile pour mieux déterminer le niveau d'infiltration et le rôle des eaux souterraines dans le bas-fond. Cette séparation a révélé un niveau très faible d'écoulement souterrain durant l'année sauf pour les mois de juillet et août.

Le troisième objectif était d'analyser critiquement la validité des données d'entrée (précipitation et évapotranspiration) mesurées sur le terrain. Ceci a été effectué à l'aide de bases de données satellitaires disponibles sur Google Earth Engine. Ces bases de données sont CHIRPS, GPM et GSMaP pour la précipitation ainsi que MOD16A2 et WAPOR pour l'évapotranspiration potentielle et de référence respectivement. Cette comparaison a montré une absence de corrélation forte entre les valeurs, à l'exception de WAPOR, ce qui indique une certaine faiblesse aux niveaux des données de terrain.

Le dernier objectif était de tester la capacité du framework python SuperflexPy à simuler l'effet d'un événement de pluie sur le bas-fond Itchedjiro. Pour cela, d'abord, une analyse de sensibilité a été effectuée afin de déterminer les paramètres les plus influençant, permettant donc de rendre l'étape

d'étalonnage plus efficace. Ensuite, une identification de tous les événements de pluie de l'année 2021 a été réalisée et 12 événements ont été choisis sur base de la corrélation entre la précipitation et le débit. L'événement 4, ayant la corrélation la plus élevée, a été utilisée pour l'étape d'étalonnage. Celle-ci a donné des bons résultats surtout avec le modèle HYMOD où les valeurs des critères de performance étaient de 0,85 pour le R^2 , 0,85 pour le NSE et 0,08 pour le RMSE.

Ensuite, l'étape de validation a été réalisée en utilisant les 11 autres événements. Dans ce cas-ci, les résultats obtenus ont été pour la plupart beaucoup moins satisfaisants, surtout pour les événements ne présentant pas un temps de décalage entre l'arrivée de la pluie et le début du ruissellement à l'exutoire. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le modèle M4 pour l'événement 8, les valeurs étant de 0,7 pour le R^2 , 0,68 pour le NSE et 0,0 pour le RMSE.

En conclusion, une simulation hydrologique efficace et précise n'a pas été obtenue pour ces 12 événements. Les raisons pour ces résultats sont multiples, cela peut être dû à un manque de données, à une erreur lors la mesure de ces valeurs, au choix des événements analysés ou encore à la taille du bas-fond. Cependant, ce mémoire a néanmoins permis de créer une bonne base dans l'objectif final de la modélisation de ce bas-fond. Un travail reste à faire, notamment dans l'intégration de paramètres qui prennent en compte la modification des conditions du bas-fond dans le temps.

6 Bibliographie

Abbaspour, K. C. (2022). *The fallacy in the use of the “best-fit” solution in hydrologic modeling*. Science of the total environment, 802, 149713.

Albergel, J. (1988). *Fonctionnement hydrologique des bas-fonds. Synthèse préliminaire*. Programme CEECIRAD N° TS2A, 17.

Albergel, J., Lamachere, J.M., Gadelle, F., Lidon, B., Mokadem, A.L., Ran, A. M., & Van Driel, W. F. (1993). *Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel ; typologie, fonctionnement hydrologique, potentialites agricoles*. Rapport final d’un projet CORAF-R3S.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Althoff, D., & Rodrigues, L. N. (2021). *Goodness-of-fit criteria for hydrological models : Model calibration and performance assessment*. Journal of Hydrology, 600, 126674.

Aonashi, K. et al. (2009). *GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm : Algorithm description and validation*. Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 87A, pp. 119–136.

Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N., & Davatgar, N. (2022). *The challenge of reference evapotranspiration between the WaPOR data set and geostatistical methods*. Irrigation and Drainage, 71(5), 1268-1279.

Bezák, N., Jemec Auflič, M., & Mikoš, M. (2019). *Application of hydrological modelling for temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides*. Landslides, 16, 1273-1283.

Bigot, S., Philippon, N., Gond, V., Moron, V., Pokam, W., Bayol, N., Boyemba, F., Kahindo, B., Samba, G., Ngomanda, A. & Gapia, M. (2016). *Etat actuel des réseaux de mesure éco-climatiques en Afrique centrale : Les ambitions du projet de recherche internationale FORGREENE*. In XXIX Colloque de L’Association Internationale de Climatologie.

Biondi, D., Freni, G., Iacobellis, V., Mascaro, G., & Montanari, A. (2012). *Validation of hydrological models : Conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c, 42, 70-76.

Bizhanimanzar, M. (2019). *Développement d’un modèle hydrologique intégré des eaux de surface et des eaux souterraines, de complexité moyenne, adapté pour les régions humides*. Université de Sherbrooke, Thèse de Génie Civil.

Blatchford, M.L., Mannaerts, C.M., Njuki, S.M., Nouri, H., Zeng, Y., Pelgrum, H., Wonink, S. & Karimi, P. (2020). *Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa*. Hydrological processes, 34(15), 3200-3221.

Brauer, C. C., Teuling, A. J., Torfs, P. J. J. F., & Uijlenhoet, R. (2014). *The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS) : a lumped rainfall–runoff model for catchments with shallow groundwater*. Geoscientific model development, 7(5), 2313-2332.

Borgoto, D. (2008). *Organisation de l'espace agropastoral d'un terroir saturé pour une gestion durable des ressources naturelles, cas de Laïnde Karewa au Nord Cameroun*. Université de Dschang, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome, option Génie Rural.

Bormann, H. & Diekkrüger, B. (2004). *A conceptual, regional hydrological model for Benin (West Africa) : validation, uncertainty assessment and assessment of applicability for environmental change analyses*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 29(11-12), 759-768.

Chabi, A., Oloukoi, J., Mama, V. J., & Kiepe, P. (2010). *Inventaire par télédétection des agro-écosystèmes de bas-fonds dans le centre du Bénin*. Cahiers Agricultures, 19(6), pp. 446-453.

Chai, T. & Draxler, R. R. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) ?—Arguments against avoiding RMSE in the literature*. Geoscientific model development, 7(3), 1247-1250.

Corroyer, D. & Rouanet, H. (1994). *Sur l'importance des effets et ses indicateurs dans l'analyse statistique des données*. L'année psychologique, 94(4), 607-623.

Cumps, F. (2008). *Mesures de débits liquides. Mesure de débits solides*. Consulté le 4 novembre 2023, disponible sur : <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/88/254188.pdf>

Dal Molin, M., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2021). *SuperflexPy*. Consulté le 24 octobre 2022, disponible sur : <https://superflexpy.readthedocs.io>

Dal Molin, M., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2020). *SuperflexPy 1.2. 0 : an open source Python framework for building, testing and improving conceptual hydrological models*. Geoscientific Model Development Discussions, 2020, 1-39.

Dal Molin, M., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2021). *SuperflexPy 1.3. 0 : an open-source Python framework for building, testing, and improving conceptual hydrological models*. Geosci. Model Dev., 14, 7047–7072.

Delville, L. P. H., Boucher, L., & Vidal, L. (1996). *Les bas-fonds en Afrique tropicale humide : stratégies paysannes, contraintes agronomiques et aménagements*. Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides, actes du séminaire international, CIRAD, 148-161.

Deng, P., Zhang, M., Guo, H., Xu, C., Bing, J., & Jia, J. (2018). *Error analysis and correction of the daily GSMaP products over Hanjiang River Basin of China*. Atmospheric Research, 214, 121-134.

Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). *A Review on Hydrological Models*. Aquatic procedia, 4, 1001-1007.

Diello, P., Paturel, J. E., Mahé, G., Barbier, B., Karambiri, H., & Servat, E. (2006). *Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'Ouest*. IAHS publ, 308, 691-697.

Dissou, F. E., Adjakpa, J. B., Tchabi, I. V., Toundoh, P. O., & Obossou, F. K. (2018). *Caractéristiques écologiques de la galerie forestière de la rivière Kossi dans les communes de Dassa-Zoumé et de Glazoué au Centre-Bénin*. European Scientific Journal, 14(21), 1857-7881.

Dussarrat, B., & Ferry, L. (1995). *Bilan des eaux, typologie des bas-fonds, érosion et modélisation sur des bassins emboîtés des Hautes Terres de Madagascar*. Bulletin de l'Académie Nationale Malgache,(spécial), 47-60.

Dube, T., Seaton, D., Shoko, C., & Mbow, C. (2023). *Advancements in Earth Observation for Water Resources Monitoring and Management in Africa : A Comprehensive Review*. Journal of Hydrology, 129738.

EBODE, V. B., DZANA, J. G., AMOUGOU, J. A., & BATHA, R. A. S. (2021). *Modélisation hydrologique et son apport en situation de non-stationnarité et de données hydropluviométriques lacunaires, application au bassin versant du Nyong à Mbalmayo*. Afrique SCIENCE, 18(3), 36-47.

Eckhardt, K. (2005). *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*. Hydrological Processes : An International Journal, 19(2), 507-515.

Eckhardt, K. (2008). *A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods*. Journal of Hydrology, 352(1-2), 168-173.

FAO. (2020). *WaPOR database methodology : Version 2 release, April 2020*. Rome. Consulté le 23 mars 2023, disponible sur : <https://doi.org/10.4060/ca9894en>

FAO (2018). *Réaliser la Faim zéro en Afrique d'ici à 2025. Bilan des progrès accomplis*. pp 75. Consulté le 16 octobre 2022, disponible sur : <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I8624FR>

FAO. (2023). *GIEWS Country Brief The Republic of Benin*. Consulté le 12 janvier 2024, disponible sur : <https://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=BEN>

Fenicia, F., Savenije, H. H., Matgen, P., & Pfister, L. (2007). *A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling*. Water Resources Research, 43(3).

Gascon, T. (2016). *Impact de la résolution spatiale et temporelle des entrées pluviométriques pour la modélisation hydrologique en Afrique de l'Ouest et implication dans l'utilisation des produits satellitaires : Etude de cas sur le Bassin de l'Ouémé au Bénin* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).

Gbenou, P., Gbesso F.K., Kouchoro, R., Gibigaye, M. (2021) *Pratiques paysannes de restauration de la fertilité des sols dans la commune de Glazoué*.

-
- Gericke, O. J., & Smithers, J. C. (2014). *Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation*. Hydrological sciences journal, 59(11), 1935-1971.
- Gonzales, A. L., Nonner, J., Heijkers, J., & Uhlenbrook, S. (2009). *Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment*. Hydrology and Earth System Sciences, 13(11), 2055-2068.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). *Time of concentration : a paradox in modern hydrology*. Hydrological Sciences Journal, 57(2), 217-228.
- Herrera, P. A., Marazuela, M. A., & Hofmann, T. (2022). *Parameter estimation and uncertainty analysis in hydrological modeling*. Wiley Interdisciplinary Reviews : Water, 9(1), e1569.
- Horton, P., Schaeffli, B., & Kauzlaric, M. (2022). *Why do we have so many different hydrological models ? A review based on the case of Switzerland*. Wiley Interdisciplinary Reviews : Water, 9(1), e1574.
- Hounkpé, J., Bossa, A. Y., Yira, Y., Fusillier, J. L., Da, A. S., & Keïta, A. (2020). *Fonctionnement hydrologique et hydraulique du bas-fond réaménagé de Bankandi (Province du Ioba, Burkina Faso)*.
- Houska, T., Kraft, P., Chamorro-Chavez, A., & Breuer, L. (2015). *SPOTting model parameters using a ready-made python package*. PloS one, 10(12), e0145180.
- Hughes, D. A., Jewitt, G., Mahé, G., Mazvimavi, D., & Stisen, S. (2015) *A review of aspects of hydrological sciences research in Africa over the past decade*. Hydrological Sciences Journal, 60 :11, 1865-1879, DOI : 10.1080/02626667.2015.1072276
- Igue, A., Houndagba, C., Chabi, A., & Assigbe, P. (2011). *Impact de l'aménagement du bas-fond de Gankpétin sur la fertilité des sols et la production du riz et du gombo au centre du Bénin*. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin, Numéro Spécial, 1, 1-11.
- Institut national de la statistique et de l'analyse économique (INSAE). (2016). *CAHIER DES VILLAGES ET QUARTIERS DE VILLE DU DEPARTEMENT DES COLLINES*.
- JAXA Earth Observation Research Center. (2023). *GSMaP Operational : Global Satellite Mapping of Precipitation*. Consulté le 25 mars 2023, disponible sur : https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JAXA_GPM_L3_GSMaP_v6_operational#bands
- Jukić, D., & Denić-Jukić, V. (2009). *Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model*. Journal of hydrology, 373(3-4), 302-315.
- Jung, G., Wagner, S., & Kunstmann, H. (2012). *Joint climate-hydrology modeling : an impact study for the data-sparse environment of the Volta Basin in West Africa*. Hydrology Research, 43(3), 231-248.
- Jung, C. G., Lee, D. R., & Moon, J. W. (2016). *Comparison of the Penman-Monteith method and regional calibration of the Hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-simulated*

results in the Seolma-cheon basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, 61(4), 793-800.

Kahn, Romain. (2022). Suivi de l'humidité de surface des sols par télédétection micro-onde et optique dans le bas-fond d'Itchedjiro, Bénin. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain. Prom. : Vanclooster, Marnik ; Jonard, François.

Kavetski, D. & Fenicia, F. (2011). *Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling- 2. Application and experimental insights*. *Water Resources Research*, 47(11).

Kchouk, S., Braiki, H., Habaieb, H., & Burte, J. (2015). *Les bas-fonds de la plaine de Kairouan : de terres marginalisées à lieux d'expérimentation agricole*. *Cahiers Agricultures*, 24(6), 404-411.

Khediri, W. B. & Drogue, G. (2015). *Quel est l'impact de l'échantillonnage spatial des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le pouvoir prédictif d'un modèle hydrologique empirique ?*. *Climatologie*, 12, 1-24.

Kidirou, S (2020). *Réponse hydrologique du bas-fond d'Itchédjiro dans la commune de Glazoué au centre du Bénin : mesures et analyse des déterminants*. Université de Parakou, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel en Ingénierie des Eaux et des Sols.

Kollat, J. B., Reed, P. M., & Wagener, T. (2012). *When are multiobjective calibration trade-offs in hydrologic models meaningful ?* *Water Resources Research*, 48(3).

Kouassi, A. M., Mamadou, A., Ahoussi, K. E., & Biemi, J. (2013). *Simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines en relation avec leurs propriétés géologiques : cas de la Côte d'Ivoire*. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 21, 138-166.

Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.

Kubota, T., Aonashi, K., Ushio, T., Shige, S., Takayabu, Y.N., Kachi, M., Arai, Y., Tashima, T., Masaki, T., Kawamoto, N. & Mega, T. (2020). *Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era*. *Satellite Precipitation Measurement : Volume 1*, 355-373.

Kumari, N., Srivastava, A., Sahoo, B., Raghuwanshi, N. S., & Bretreger, D. (2021). *Identification of Suitable Hydrological Models for Streamflow Assessment in the Kangsabati River Basin, India, by Using Different Model Selection Scores*. *Natural Resources Research*, 30(6), 4187-4205.

Lawin, I. F., Houèthégnon, T., Fandohan, A. B., Salako, V. K., Assogbadjo, A. E., & Ouinsavi, C.A.I.N. (2019). *Connaissances et usages de Cola millenii K. Schum. (Malvaceae) en zones guineenne et soudano-guineenne au Bénin*. *Bois et Forêts des Tropiques*, 339 : 61-74. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31716>

Lavanya, A., Gaurav, L., Sindhuja, S., Seam, H., Joydeep, M., Uppalapati, V., Ali, W. & SD, V.S. (2023). *Assessing the Performance of Python Data Visualization Libraries : A Review*. *International Journal of Computer Engineering in Research Trends* (Vol. 10, No. 1, pp. 29–39)

Lázaro, J. M., Navarro, J. Á. S., Gil, A. G., & Romero, V. E. (2015). *A new adaptation of linear reservoir models in parallel sets to assess actual hydrological events*. Journal of Hydrology, 524, 507-521.

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2002). *Comparison of two different approaches of sensitivity analysis*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 27(9-10), 645-654.

Leroy, M. (2002). *La mesure au sol de la température et des précipitations*. La météorologie, 2002(39), 52-56.

Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D. B., Kummerow, C. D., Nakamura, K., & Turk, F. J. (Eds.). (2020). *Satellite precipitation measurement*. Advances in Global Change Research, volume 67. Doi : https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_25

Lim, K. J., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K. S., Muthukrishnan, S., & Tripathy, D. (2005). *Automated web GIS based hydrograph analysis tool, WHAT 1*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 41(6), 1407-1416.

Liu, Y., & Gupta, H. V. (2007). *Uncertainty in hydrologic modeling : Toward an integrated data assimilation framework*. Water resources research, 43(7).

Lyne, V., & Hollick, M. (1979). *Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling*. Institute of engineers Australia national conference (Vol. 79, No. 10, pp. 89-93). Barton, Australia : Institute of Engineers Australia.

Marius, V. T. K. (2022). *Agricultural crises and the roles of local communities in food security in Benin*. International Journal Water Sciences and Environment Technologies (Vol. (vii), No. 1, pp. 90-100).

Musy, A. & Higy, C. (Eds.). (2010). *Hydrology : A Science of Nature (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10426>

NASA GES DISC. (2023). *GPM : Global Precipitation Measurement (GPM) v6*. Consulté le 26 mars 2023, disponible sur : https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GPM_L3_IMERG_V06#citations

Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). *Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses*. Water resources research, 26(7), 1465-1473.

Bouvier, C (1989). *Contribution à l'étude du ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest Application à la simulation des écoulements Sur petits bassins urbains*. Université de Montpellier, Thèse de Génie Mécanique et Génie Civil.

Ollivier, C.C., Carrière, S.D., Heath, T., Oliosio, A., Rabefitia, Z., Rakoto, H., Oudin, L. & Satgé, F. (2023). *Ensemble precipitation estimates based on an assessment of 21 gridded precipitation datasets*

to improve precipitation estimations across Madagascar. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 47, 101400.

Parra, V., Fuentes-Aguilera, P., & Muñoz, E. (2018). *Identifying advantages and drawbacks of two hydrological models based on a sensitivity analysis : a study in two Chilean watersheds*. *Hydrological Sciences Journal*, 63(12), 1831-1843.

Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., & Wheeler, H. S. (2011). *Catchment scale hydrological modelling/ A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications*. *Global NEST journal*, 13(3), 193-214.

Perdikaris, J., Gharabaghi, B., & Rudra, R. (2018). *Reference time of concentration estimation for ungauged catchments*. *Earth Sci. Res*, 7(2), 58-73.

Perret, C. (2007). *Le moulinet d'hydrométrie à axe horizontal à hélice. Etalonnage, équation du mouvement, facteurs d'influence*. Consulté le 29 octobre 2023, disponible sur : [https ://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/fiche_4-2_moulinet.pdf](https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/fiche_4-2_moulinet.pdf)

Perret, C. (2008). *Les moyens de contrôle et de mesure des débits-les capteurs et les méthodes*. *Journées de l'hydraulique*, 30 (1), 1-12.

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

Petit, S. & Vanclooster, M. (2019). *Appui technique et scientifique pour la valorisation et la gestion intégrée et durable des eaux dans les BAs-FONds au BÉnin pour l'irrigation (BAFONBÉ)*. Louvain4Water : The Language of Water (Louvain-la-Neuve, Belgium, 18/03/2019).

Pfannerstill, M., Guse, B., & Fohrer, N. (2014). *A multi-storage groundwater concept for the SWAT model to emphasize nonlinear groundwater dynamics in lowland catchments*. *Hydrological processes*, 28(22), 5599-5612.

Quan, Z., Teng, J., Sun, W., Cheng, T., & Zhang, J. (2015). *Evaluation of the HYMOD model for rainfall-runoff simulation using the GLUE method*. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, 180-185.

Ramírez, J. A. (2000). *Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics*. *Inland flood hazards : Human, riparian and aquatic communities*, 498.

Raunet, M. (1985). *Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative*. *L'Agro-nomie Tropicale* 40-3.

Ritter, A. & Muñoz-Carpena, R. (2013). *Performance evaluation of hydrological models : Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments*. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.

Running, S., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2021). *MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Consulté le 21 mars 2023, disponible sur : <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.061>

SAMAKE, M., TRAORE, O. D., & BAMBA, F. (2021). *Nature, grandeur et cause de l'erreur d'estimation de l'évapotranspiration potentielle par la méthode FAO-56 en climat Soudano-Sahélien*. Afrique SCIENCE, 19(3), 54-62.

Satgé, F., Defrance, D., Sultan, B., Bonnet, M.P., Seyler, F., Rouché, N., Pierron, F. & Paturel, J.E. (2020). *Evaluation of 23 gridded precipitation datasets across West Africa*. Journal of Hydrology, 581, 124412.

Segovia-Cardozo, D. A., Bernal-Basurco, C., & Rodríguez-Sinobas, L. (2023). *Tipping Bucket Rain Gauges in Hydrological Research : Summary on Measurement Uncertainties, Calibration, and Error Reduction Strategies*. Sensors, 23 (12), 5385.

Serpantié, G., Dorée, A., Fusillier, J.L., Moity Maizi, P., Lidon, B., Douanio, M., Sawadogo, A., Bossa, A.Y. & Hounkpè, J. (2019). *Nouveaux risques dans les bas-fonds des terroirs soudaniens. Une étude de cas au Burkina Faso*.

Shen, Z., Yong, B., Gourley, J.J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., Ren, L., Hong, Y. & Zhang, J. (2020). *Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS)*. Journal of Hydrology, 591, 125284.

Singh, S. K. & Bárdossy, A. (2012). *Calibration of hydrological models on hydrologically unusual events*. Advances in Water Resources, 38, 81-91.

SoilGrids. (2020). Consulté le 13 avril 2023, disponible sur : <https://soilgrids.org/>

SOGNON, D. P., ASSONGBA, Y. F., AHOUANVOEGBE, P., VODOUNON, S. H. T., & YOKA, J. (2020). *Astreintes climatiques et production d'igname dans la Commune de Glazoué au Centre Bénin, Afrique de l'Ouest*. Afrique SCIENCE, 17(6), 207-222.

Souberou, K. T., Joseph, O., & Amoussou, E. (2016). *CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL EN BAS-FONDS AMENAGEABLES DE LA COMMUNE DE MATERI AU BENIN*. Revue de Géographie de l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO. 2. 69-89.

Souberou, K. T., Barre, I. O., Yabi, I., & Ogouwale, E. (2018). *Fondements géographiques de la valorisation agricole des bas-fonds au Sud du bassin versant de l'Oti (Bénin)*. European Scientific Journal, ESJ, 14(21), 1601-1623.

Souberou, K. T., Agbossou, K. E., & Ogouwale, E. (2017). *Inventaire et caractérisation des bas-fonds dans le bassin versant de l'Oti au Bénin à l'aide des images Landsat et ASTER DEM*. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 2(4), 238832.

Stephenson, N. (1998). *Actual evapotranspiration and deficit : biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales*. Journal of biogeography, 25(5), 855-870.

Sun, Y., Bao, W., Valk, K., Brauer, C. C., Sumihar, J., & Weerts, A. H. (2020). *Improving forecast skill of lowland hydrological models using ensemble Kalman filter and unscented Kalman filter*. *Water Resources Research*, 56(8), e2020WR027468.

Unicef. (2022). *Le nombre de personnes souffrant de la faim dans le monde a atteint 828 millions en 2021*. Consulté le 16 octobre 2022, disponible sur : <https://www.unicef.fr/article/le-nombre-de-personnes-souffrant-de-la-faim-dans-le-monde-a-atteint-828-millions-en-2021/>

UVCW. (2023). *Monographie de la commune de Glazoue*. Rapport d'étude, Programme d'Appui au démarrage des Communes. Mairie de Glazoué.

Vanclooster, M. (2023). *Climatologie et hydrologie appliquee a l'agronomie et environnement, Partim Hydrologie, Notes de cours, Universite catholique de Louvain, Agro-Louvain*.

Villarini, G., Mandapaka, P. V., Krajewski, W. F., & Moore, R. J. (2008). *Rainfall and sampling uncertainties : A rain gauge perspective*. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113 (D11).

Wanzala, M. A., Ficchi, A., Cloke, H. L., Stephens, E. M., Badjana, H. M., & Lavers, D. A. (2022). *Assessment of global reanalysis precipitation for hydrological modelling in data-scarce regions : A case study of Kenya*. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 41, 101105.

Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). *A review of criteria of fit for hydrological models*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(11), 1765-1772.

Waseem, M., Kachholz, F., Klehr, W., & Traenckner, J. (2020). *Suitability of a coupled hydrologic and hydraulic model to simulate surface water and groundwater hydrology in a typical North-Eastern Germany lowland catchment*. *Applied Sciences*, 10(4), 1281.

Wöhling, T., Samaniego, L., & Kumar, R. (2013). *Evaluating multiple performance criteria to calibrate the distributed hydrological model of the upper Neckar catchment*. *Environmental earth sciences*, 69, 453-468.

World Bank. (2021). *Pauvreté*. Consulté le 19 octobre 2022, disponible sur : <https://www.banquemondiale.org/fr/topic/poverty/overview>

Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). *Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—a review*. *Agricultural Water Management*, 232, 106043.

Xie, J., Liu, X., Wang, K., Yang, T., Liang, K., & Liu, C. (2020). *Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States*. *Journal of Hydrology*, 583, 124628.

Yang, W., Xiao, C., Zhang, Z., & Liang, X. (2021). *Can the two-parameter recursive digital filter baseflow separation method really be calibrated by the conductivity mass balance method?*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 1747-1760.

Yoosefdoost, I., Bozorg-Haddad, O., Singh, V. P., & Chau, K. W. (2022). *Hydrological Models*.

In Climate Change in Sustainable Water Resources Management (pp. 283-329). Singapore : Springer Nature Singapore.

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S. & Lesiv, M. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*. Consulté le 10 avril 2023, disponible sur : <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>

Zannou, S. (2022). *Pression urbaine et vulnérabilité des terres agricoles dans l'arrondissement de vakon (commune de akpro-misserete)*. International Journal Water Sciences and Environment Technologies. Vol. (vii), No.1, Mars 2022, pp. 54-67.

Zhang, Y., Hanati, G., Danierhan, S., Liu, Q., & Xu, Z. (2020). *Evaluation and comparison of daily GPM/TRMM precipitation products over the Tianshan Mountains in China*. Water, 12(11), 3088.

Zhou, L., Liu, P., Gui, Z., Zhang, X., Liu, W., Cheng, L., & Xia, J. (2022). *Diagnosing structural deficiencies of a hydrological model by time-varying parameters*. Journal of Hydrology, 605, 127305.

7 Annexes

7.1 Septs autres événements d'intérêts

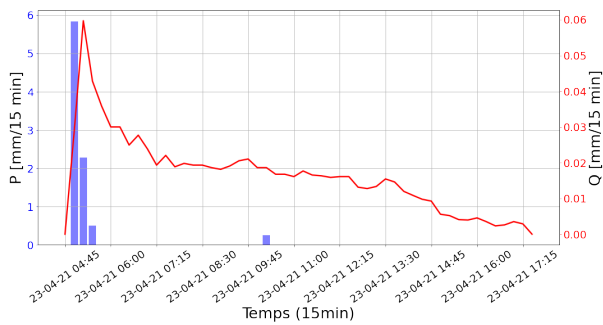


FIGURE 42 – Événement 1

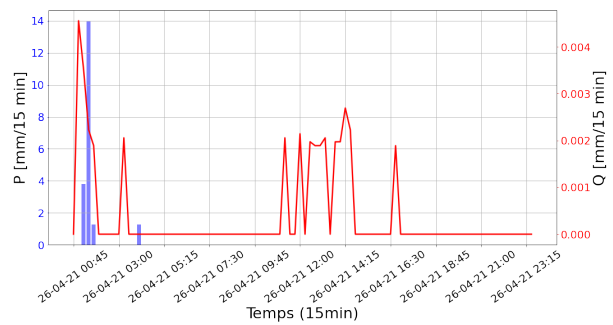


FIGURE 43 – Événement 3

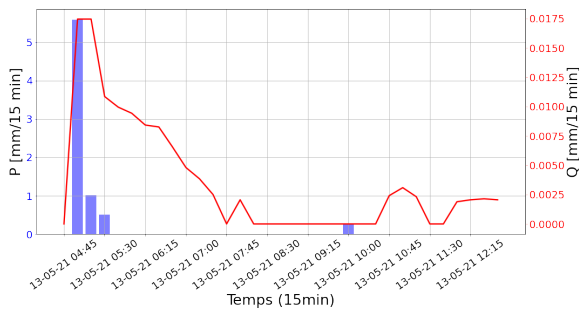


FIGURE 44 – Événement 7

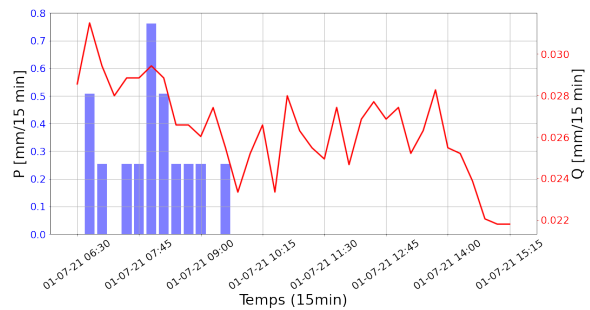


FIGURE 45 – Événement 13

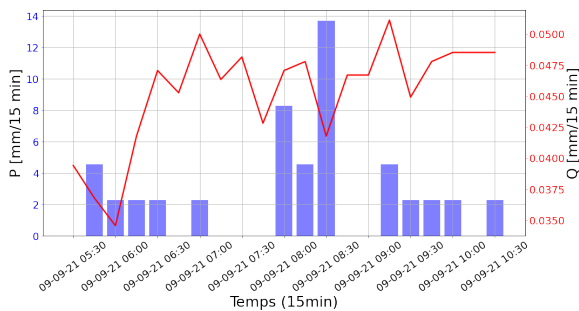


FIGURE 46 – Événement 18

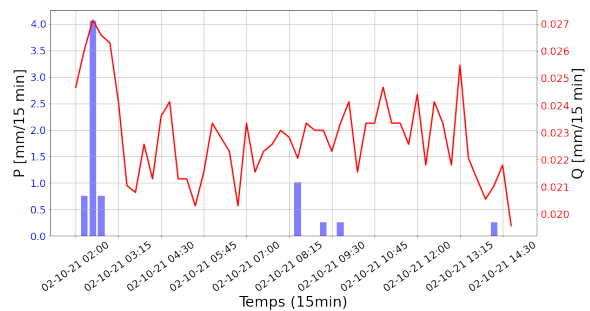


FIGURE 47 – Événement 21

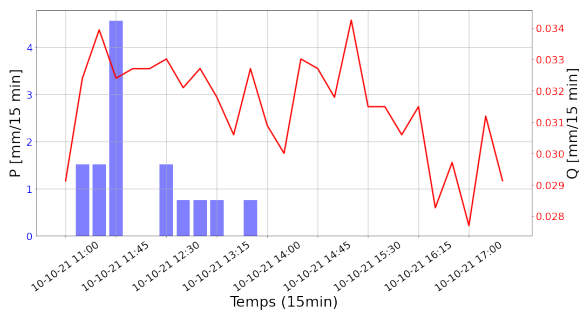


FIGURE 48 – Événement 22

7.2 Corrélation des cinq événements

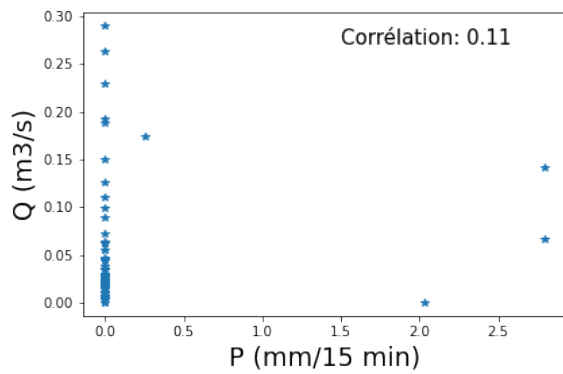


FIGURE 49 – Corrélation de l'événement 2 avant décalage

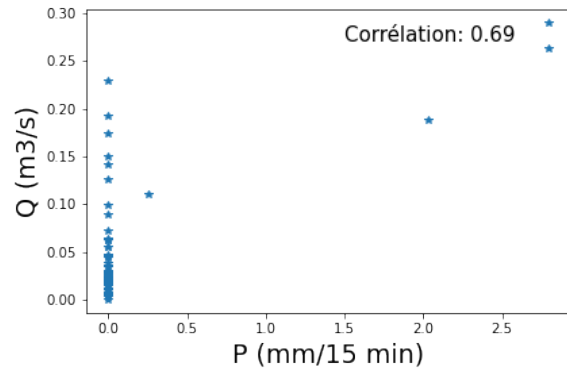


FIGURE 50 – Corrélation de l'événement 2 après décalage

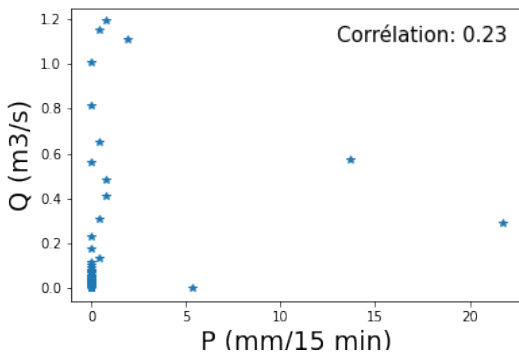


FIGURE 51 – Corrélation de l'événement 4 avant décalage

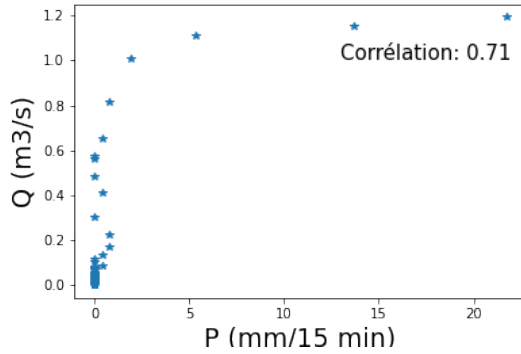


FIGURE 52 – Corrélation de l'événement 4 après décalage

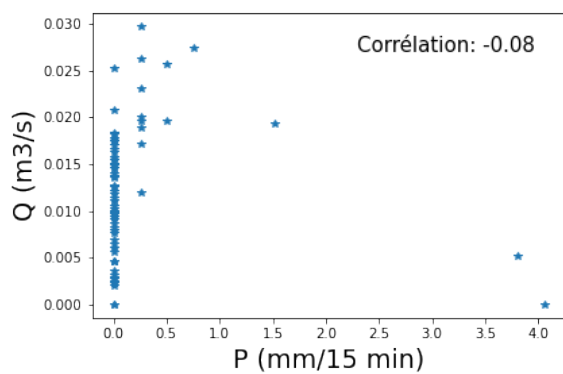


FIGURE 53 – Corrélation de l'événement 8 avant décalage

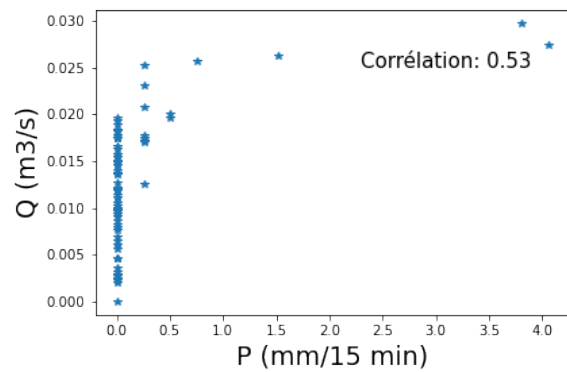


FIGURE 54 – Corrélation de l'événement 8 après décalage

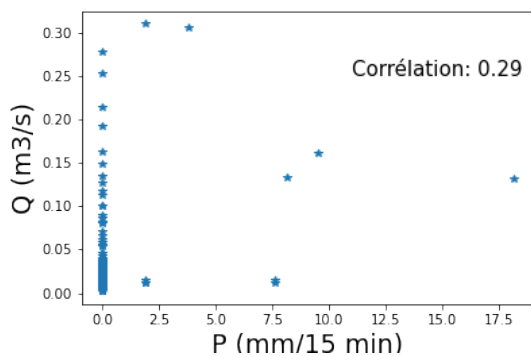


FIGURE 55 – Corrélation de l'événement 12 avant décalage

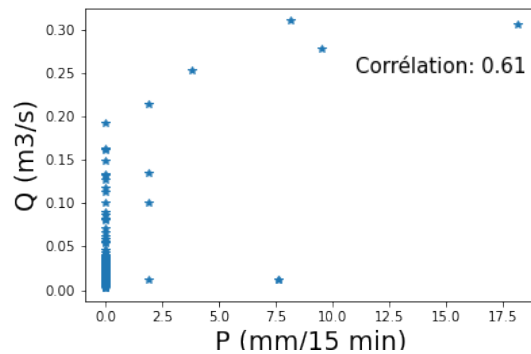


FIGURE 56 – Corrélation de l'événement 12 après décalage

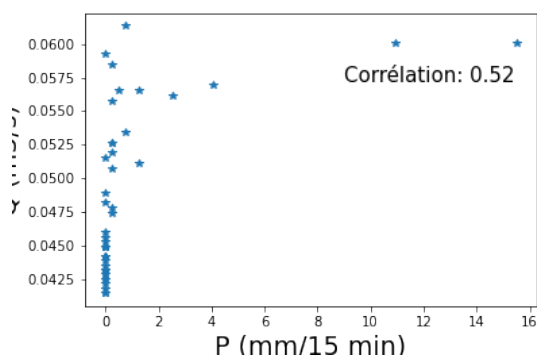


FIGURE 57 – Corrélation de l'événement 15 avant décalage

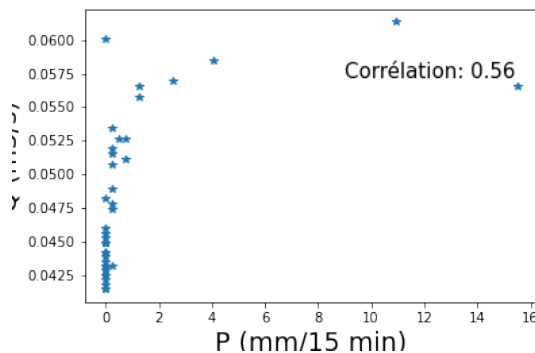


FIGURE 58 – Corrélation de l'événement 15 après décalage

7.3 Corrélation des données d'entrées

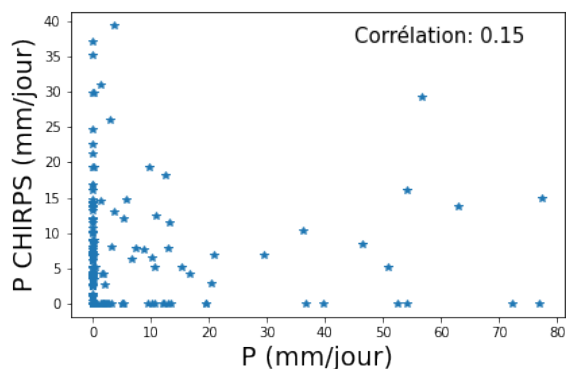


FIGURE 59 – Corrélation P in situ et P CHIRPS

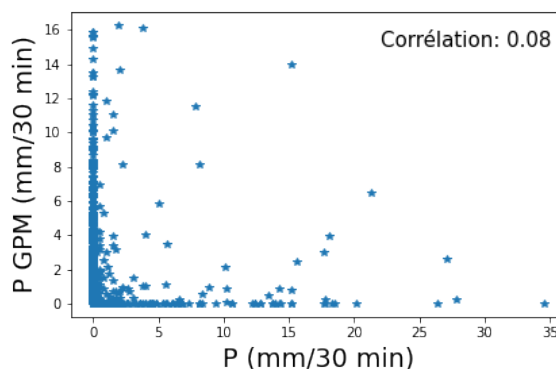


FIGURE 60 – Corrélation P in situ et P GPM

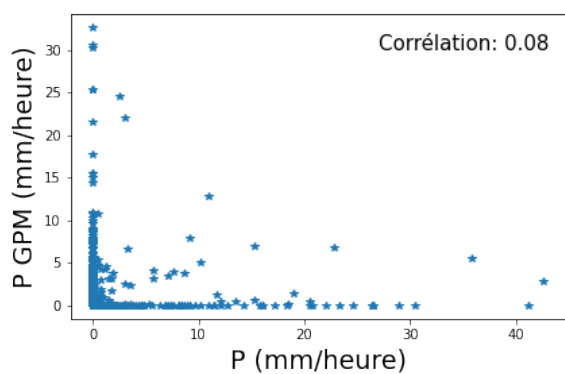


FIGURE 61 – Corrélation P in situ et P GSMaP

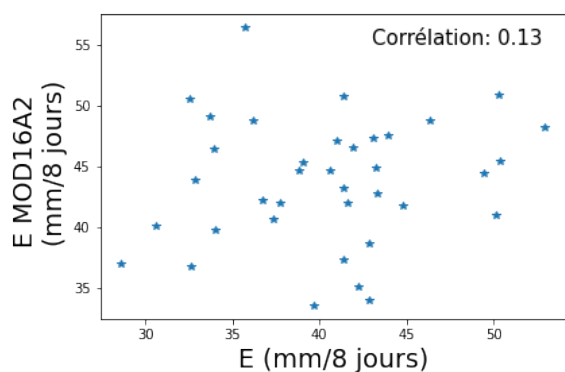


FIGURE 62 – Corrélation ETP in situ et ETP MOD16A2

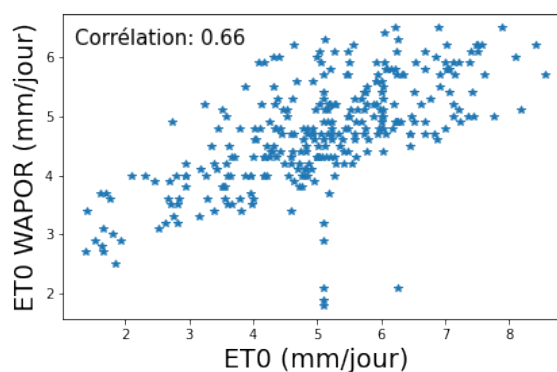


FIGURE 63 – Corrélation ET0 in situ et ET0 WAPOR

7.4 Événement de l'analyse de sensibilité

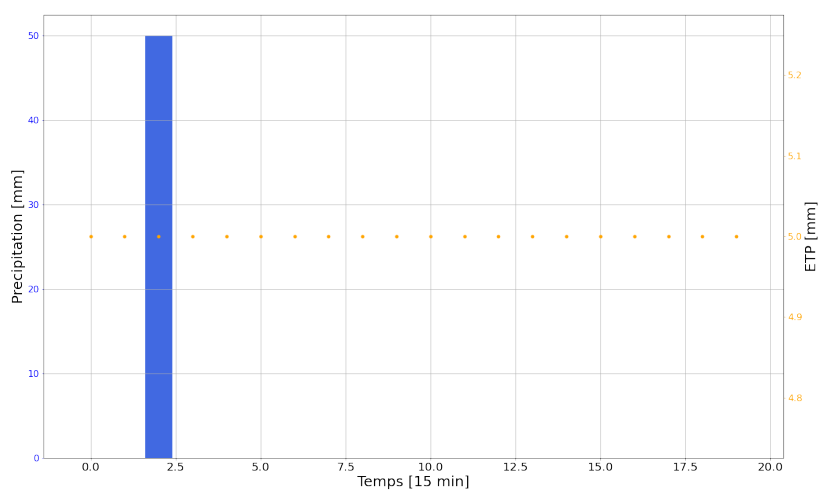


FIGURE 64 – Événement pluvieux aléatoire

7.5 Validations des sept autres événements

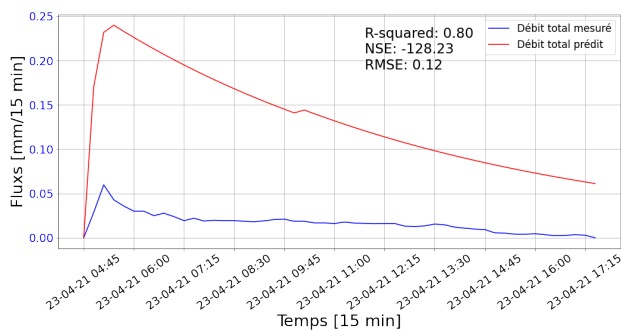


FIGURE 65 – Linear Reservoir pour événement 1

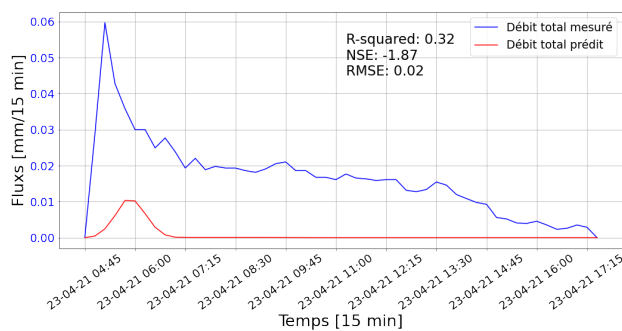


FIGURE 66 – GR4J pour événement 1

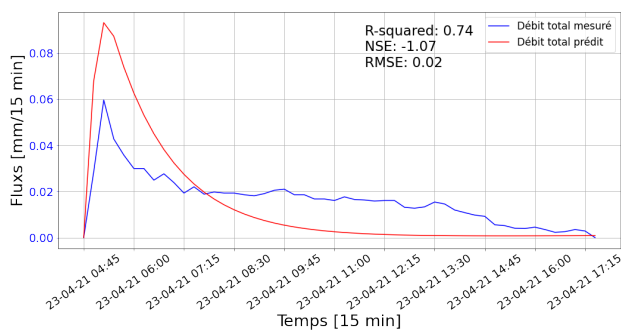


FIGURE 67 – HYMOD pour événement 1

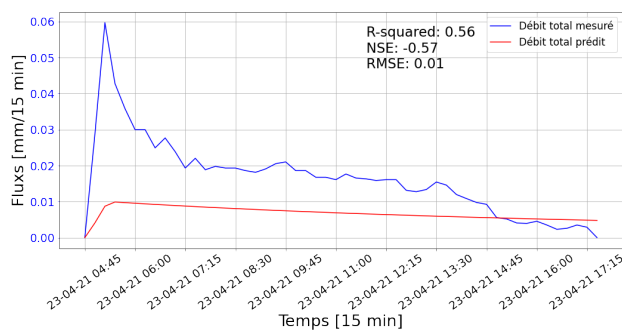


FIGURE 68 – M4 pour événement 1

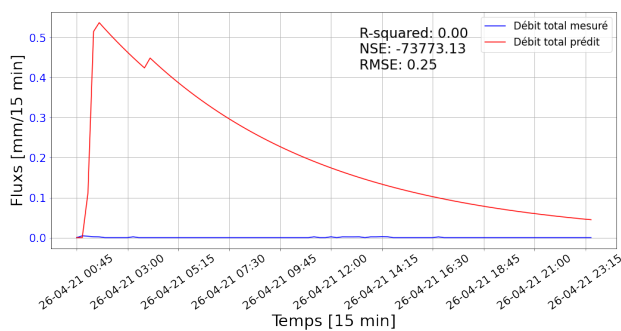


FIGURE 69 – Linear Reservoir pour événement 3

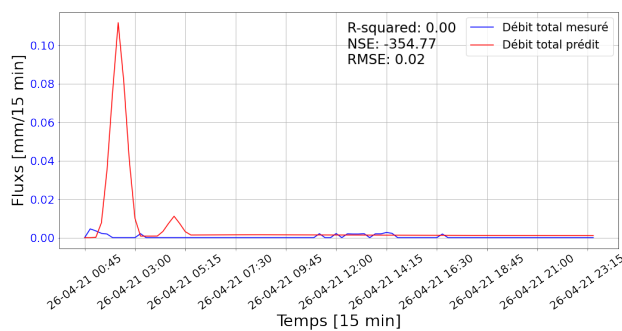


FIGURE 70 – GR4J pour événement 3

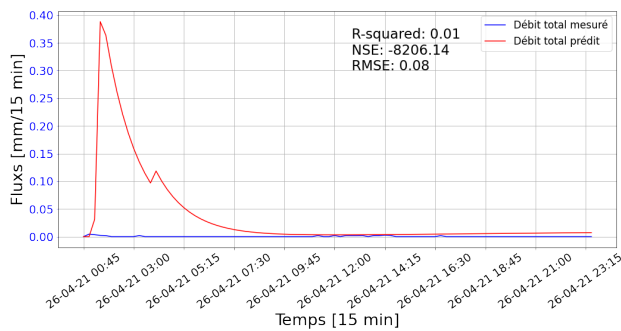


FIGURE 71 – HYMOD pour événement 3

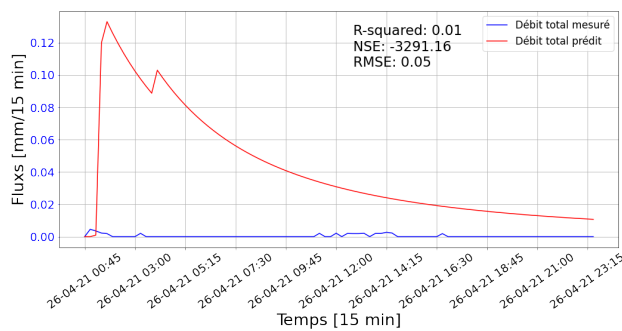


FIGURE 72 – M4 pour événement 3

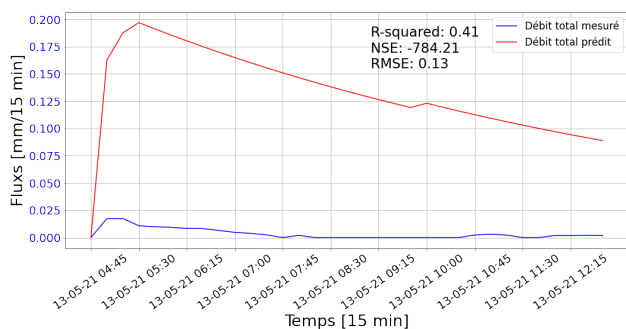


FIGURE 73 – Linear Reservoir pour événement 7

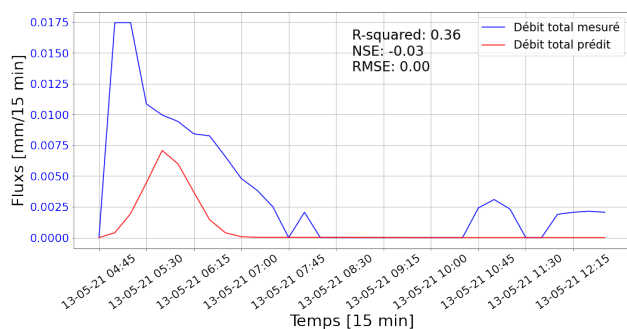


FIGURE 74 – GR4J pour événement 7

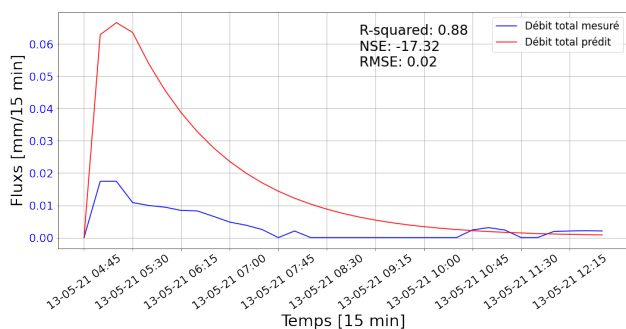


FIGURE 75 – HYMOD pour événement 7

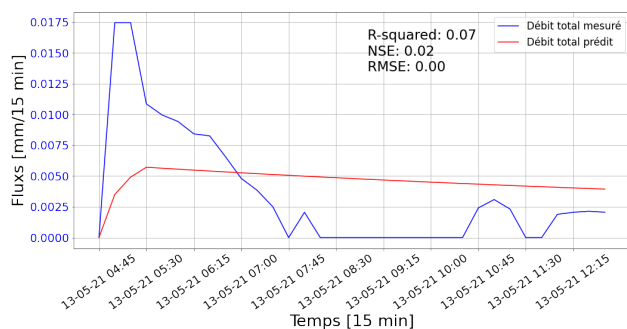


FIGURE 76 – M4 pour événement 7

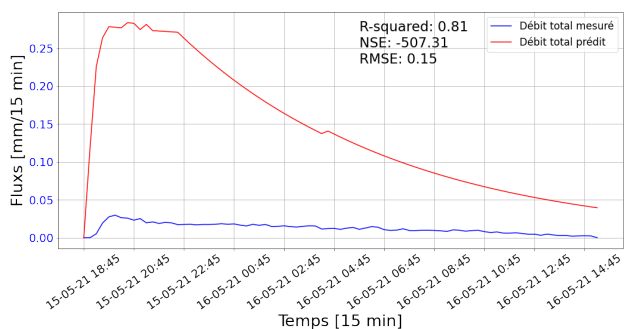


FIGURE 77 – Linear Reservoir pour événement 8

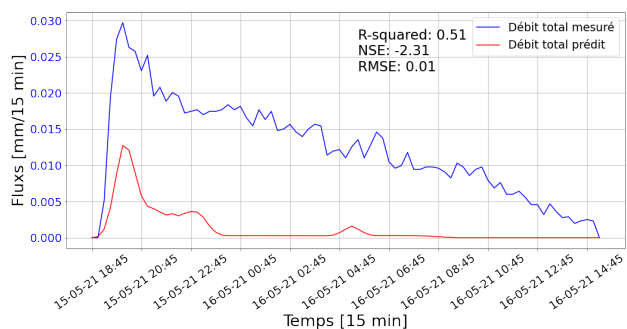


FIGURE 78 – GR4J pour événement 8

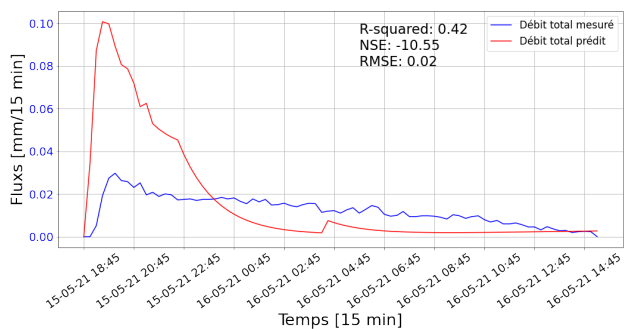


FIGURE 79 – HYMOD pour événement 8

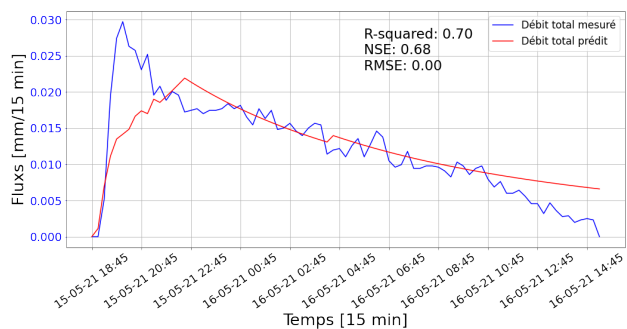


FIGURE 80 – M4 pour événement 8

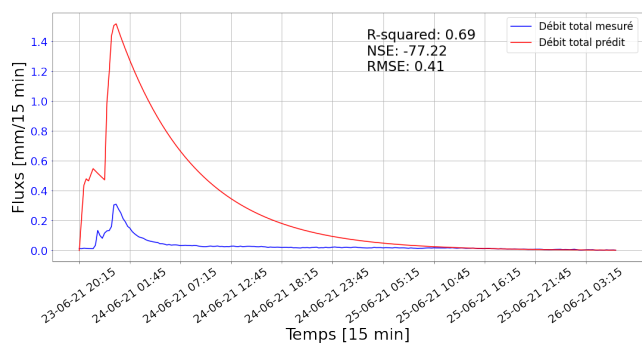


FIGURE 81 – Linear Reservoir pour événement 12

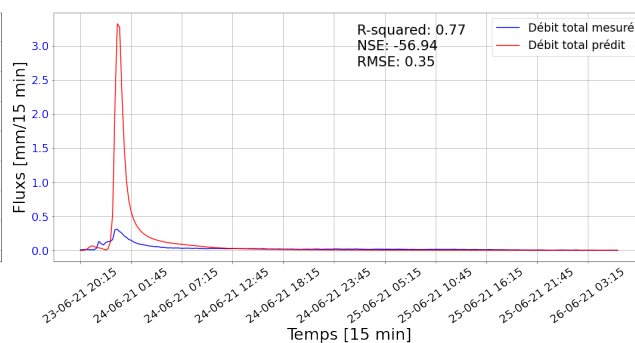


FIGURE 82 – GR4J pour événement 12

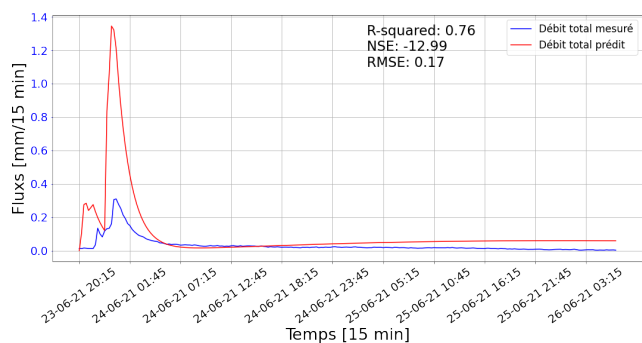


FIGURE 83 – HYMOD pour événement 12

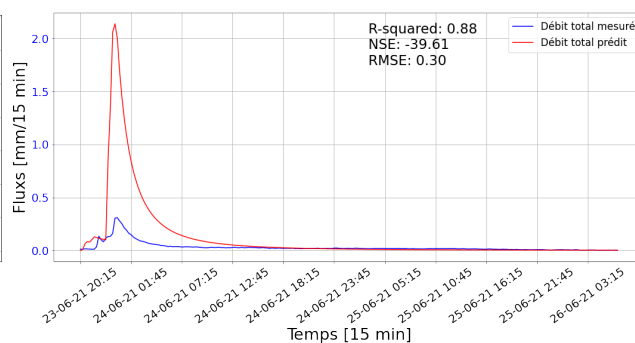


FIGURE 84 – M4 pour événement 12

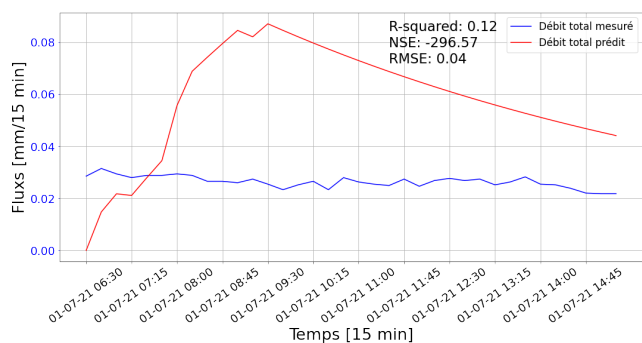


FIGURE 85 – Linear Reservoir pour événement 13

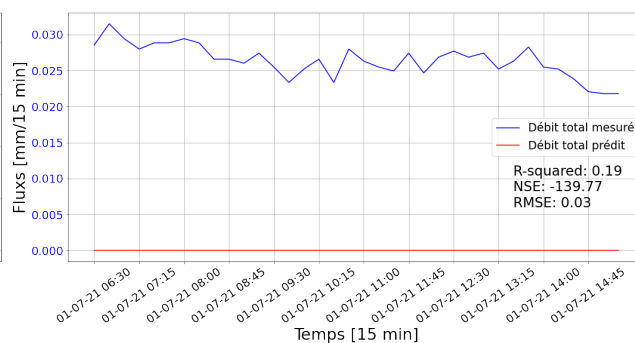


FIGURE 86 – GR4J pour événement 13

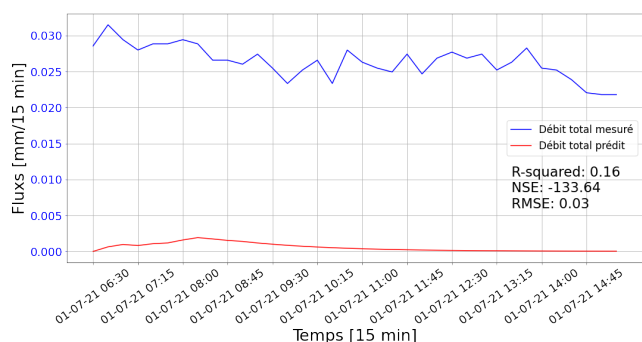


FIGURE 87 – HYMOD pour événement 13

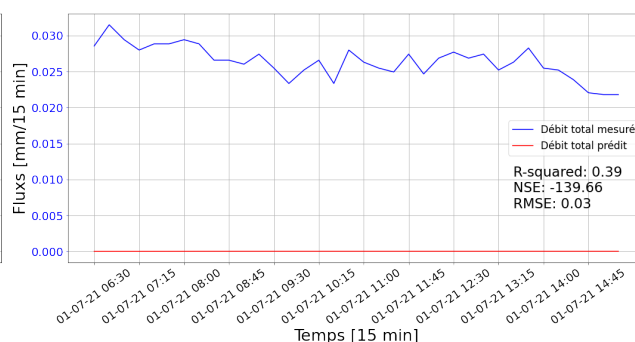


FIGURE 88 – M4 pour événement 13

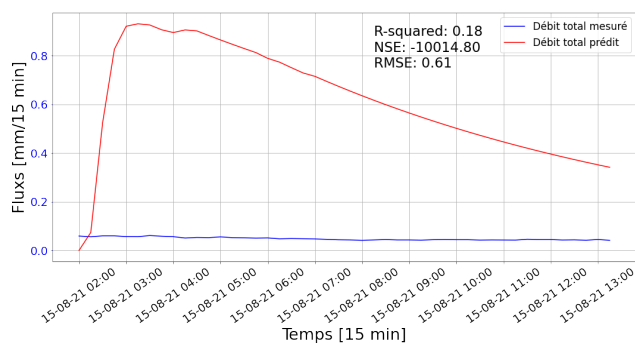


FIGURE 89 – Linear Reservoir pour événement 15

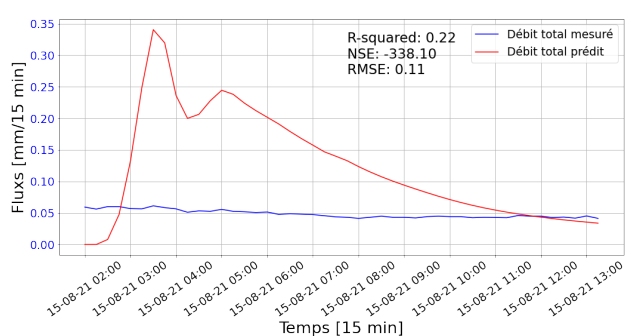


FIGURE 90 – GR4J pour événement 15

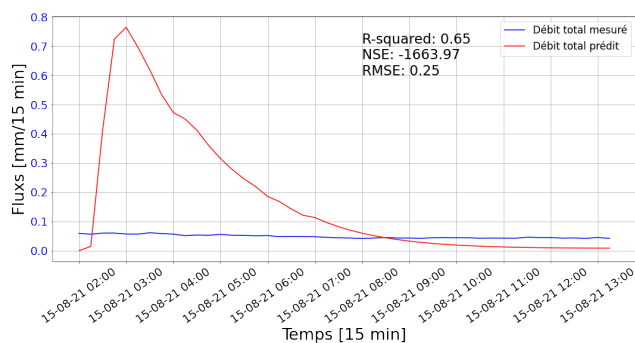


FIGURE 91 – HYMOD pour événement 15

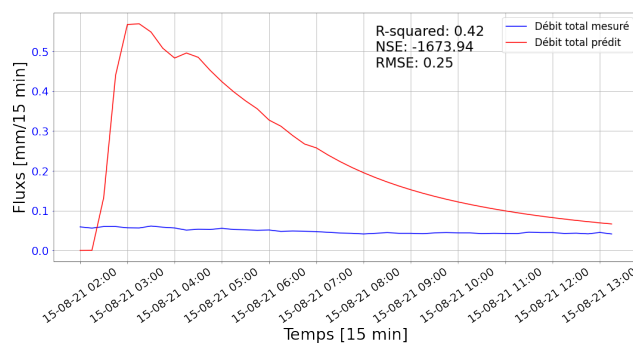


FIGURE 92 – M4 pour événement 15

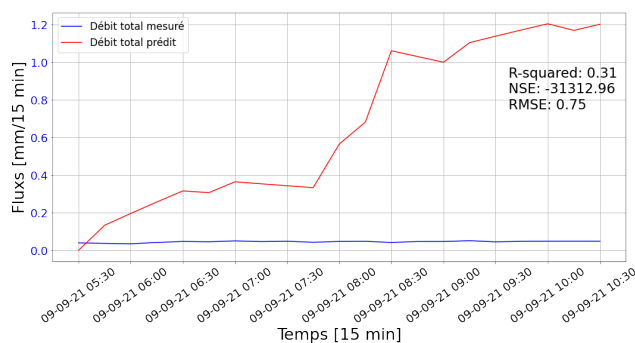


FIGURE 93 – Linear Reservoir pour événement 18

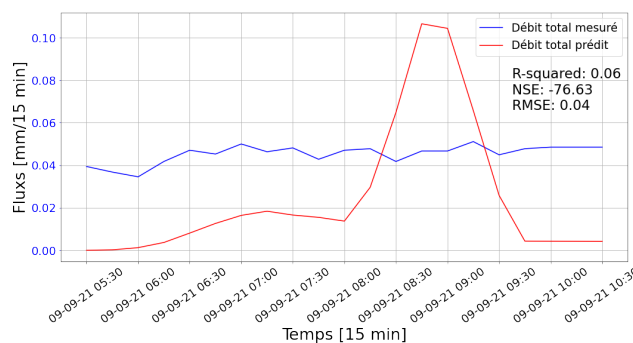


FIGURE 94 – GR4J pour événement 18

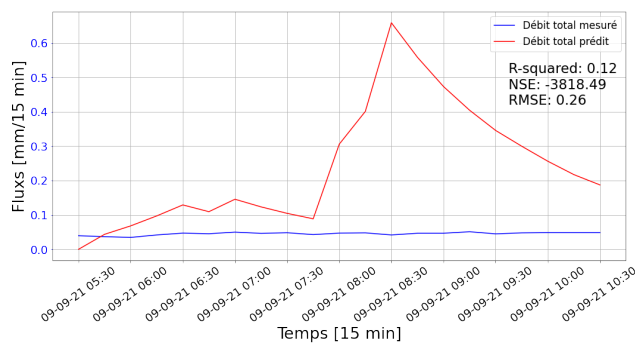


FIGURE 95 – HYMOD pour événement 18

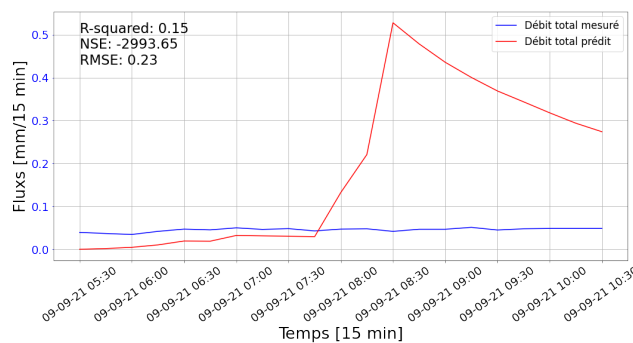


FIGURE 96 – M4 pour événement 18

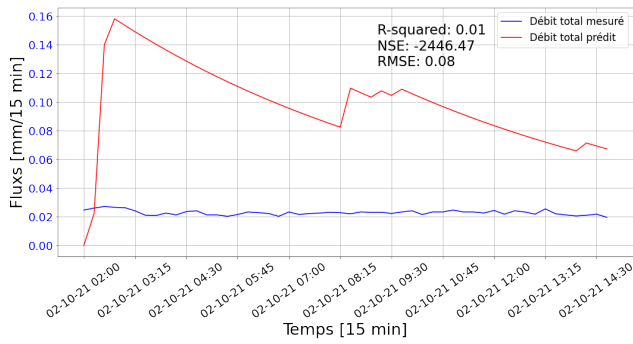


FIGURE 97 – Linear Reservoir pour événement 21

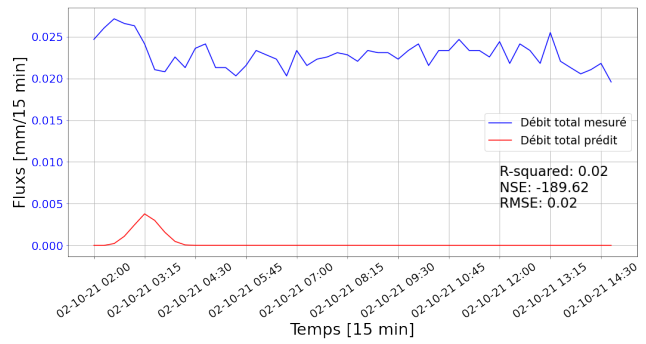


FIGURE 98 – GR4J pour événement 21

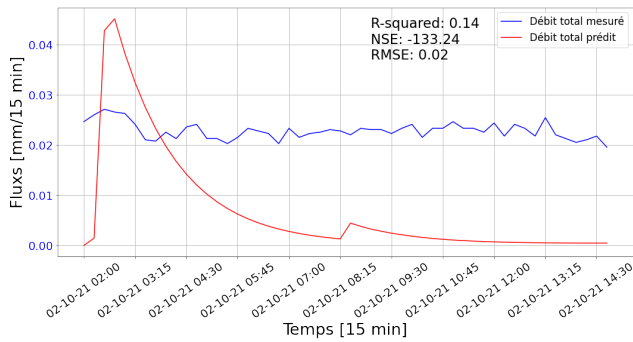


FIGURE 99 – HYMOD pour événement 21

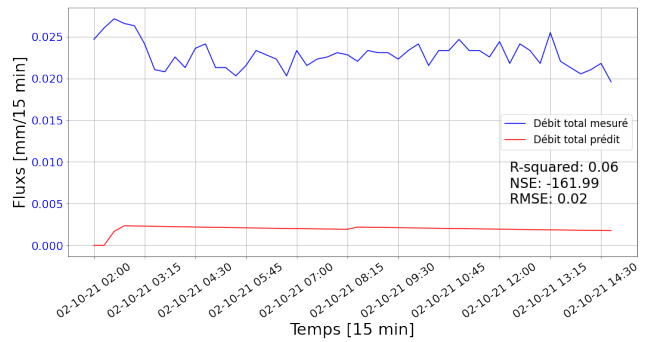


FIGURE 100 – M4 pour événement 21

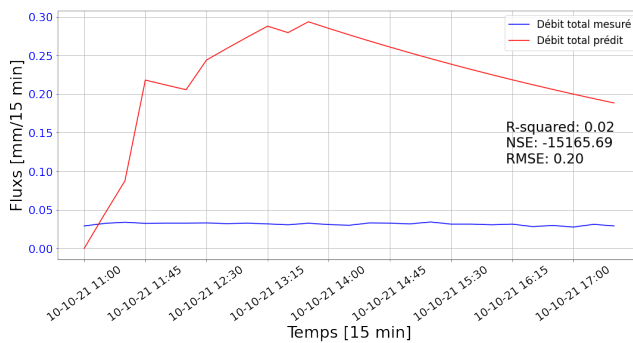


FIGURE 101 – Linear Reservoir pour événement 22

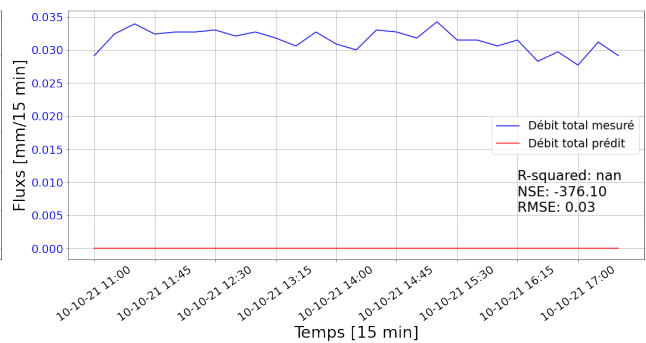


FIGURE 102 – GR4J pour événement 22

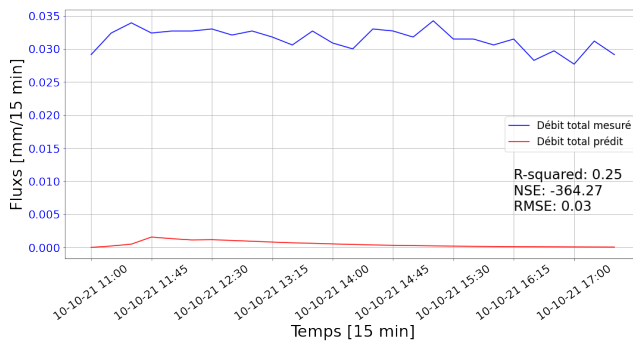


FIGURE 103 – HYMOD pour événement 22

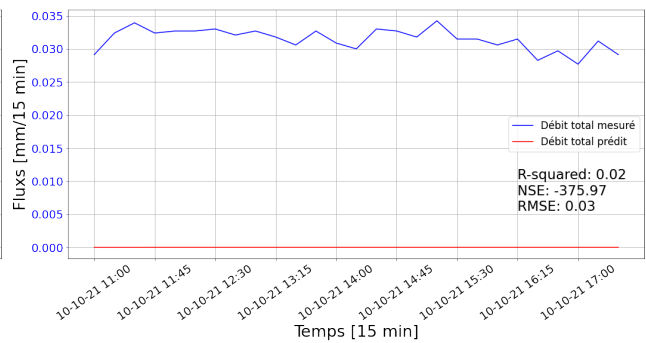


FIGURE 104 – M4 pour événement 22

Modélisation du fonctionnement hydrologique du bas-fond d'Itchedjiro au Bénin avec SuperflexPy

Madeleine de Marnix

À cause de son contexte climatique et économique, le Bénin est fortement confronté à la problématique de la sécurité alimentaire et de l'accès en eau. Étant majoritairement pluviale, l'agriculture est très vulnérable face aux périodes de sécheresse, ce qui n'est qu'intensifié par les changements climatiques. Ainsi, une gestion efficace de l'eau apportée par les précipitations est cruciale.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet BAFONBE qui a pour objectif de renforcer les connaissances sur le fonctionnement hydraulique de bas-fonds pilotes au Bénin. Ces terres humides ont un haut potentiel agricole, mais sont sous-utilisées dues principalement à un manque d'aménagements hydroagricoles rentables et durables. Ainsi, le but de ce projet est, à terme, de concevoir ces aménagements pour assurer la sécurité alimentaire et améliorer les moyens d'existence des ménages agricoles de la région.

L'objectif général de ce travail se divise en quatre sous-objectifs. Premièrement, une appréhension générale de ce qu'est un bas-fond est effectué à l'aide d'une revue bibliographique. Deuxièmement, une identification du comportement du bas-fond d'Itchedjiro au Bénin est réalisée en analysant la relation entre la précipitation, l'ETP et le débit. Troisièmement, la validité des mesures de précipitation et d'ETP effectuées sur le terrain est déterminé en les comparant à plusieurs jeux de données climatiques satellitaires tels que CHIRPS, GPM et WAPOR.

Enfin, le dernier objectif est d'utiliser l'open source python framework SuperflexPy pour construire un modèle hydrologique conceptuel afin de simuler l'effet d'un évènement pluvieux sur le bas-fond d'Itchedjiro au Bénin. Ce framework permet d'utiliser des modèles conceptuels hydrologiques populaires comme GR4J et HYMOD. Pour cette modélisation, une analyse de sensibilité et un étalonnage manuel des paramètres sont effectués afin de prendre en compte les caractéristiques du bas-fond qui influencent l'infiltration et le ruissellement de l'eau.