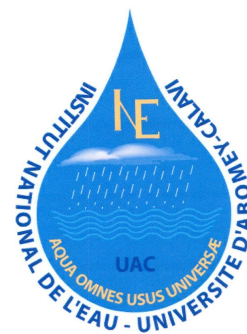




RÉPUBLIQUE DU BÉNIN

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI
INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

Mémoire

pour l'obtention du diplôme de **Master professionnel**
Spécialité : Hydrologie et Gestion des Ressources en eau
Option : Hydro-Informatique

DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE POUR LA PREVISION DES INONDATIONS DANS LES BASSINS DU BENIN

Présenté par :
AHOUCANDJINOU Enagnon Jérôme

Superviseur :
Prof Luc O.C. SINTONDJI
Enseignant-Chercheur à INE/ UAC
Professeur Titulaire des Universités du CAMES

Co-superviseur :
Dr Aymar Yaovi BOSSA
Enseignant-Chercheur INE/ UAC

Soutenu à Abomey-calavi, le 26 décembre 2023

Composition du jury

Président : **Prof Eugène EZIN** Enseignant-Chercheur à IFRI/ UAC
Membres : 1- **Dr Jean HOUNKPE** Enseignant-Chercheur à INE/ UAC
2- **Dr Aymar Yaovi BOSSA** Enseignant-Chercheur à INE/ UAC
3- **Dr Audace DOSSOU-OLORY** Enseignant-Chercheur à INE/ UAC

Année académique 2022 - 2023

CERTIFICATION

Nous certifions que ce travail a été réalisé par AHOUANDJINOUE Enagnon Jérôme, étudiant en Master en Hydro-informatique au Département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eaux de l'Institut National de l'Eau de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) sous notre supervision.

Fait à Abomey-Calavi le 21 decembre 2023

Signatures

Superviseur :

Co-Superviseur :

Prof Luc O. C. SINTONDI
Professeur Titulaire CAMES
INE / UAC

Dr Aymar Yaovi BOSSA
Enseignant-Chercheur à INE / UAC

DÉDICACE

« *Dédicace* »

A mes parents :

○ AHOUANDJINOUE Abel

○ AVLESSI Rosaline

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans la grâce de Dieu et les soutiens personnels et scientifiques de nombreuses personnes que je ne peux toutes citer. Qu'il me soit permis ici d'adresser mes vifs remerciements à :

- L'Eternel Dieu Tout Puissant, seul faiseur de prodiges, qui oriente notre vie. Qu'Alléluia lui soit rendu au plus haut des cieux !
- Prof Luc O. C SINTONDI, Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi ; mon superviseur pour avoir accepté superviser ce travail malgré son agenda chargé ;
- Dr Aymar Yaovi BOSSA, Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi ; mon Co-superviseur pour avoir accepté Co-superviser ce travail malgré ses multiples occupations ;
- Dr Jean HOUNKPE, Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi ; pour son encadrement technique, ses conseils scientifiques malgré ses multiples occupations et pour sa disponibilité tout au long de ce travail ;
- Prof. Flavien DOVONOU, le Chef du Département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau (HGRE), pour tous les efforts qu'il a fournis pour la formation des étudiants ;
- Dr Audace A.V. DOSSOU-OLORY pour ses conseils et son apport toute au long de ce travail ;
- A mes très chers parents géniteur Abel AHOUANDJINOUE et Rosaline AVLESSI pour leur soutiens moral et matériel ;
- A l'ensemble du corps professoral et administratif de l'INE, plus particulièrement tous ceux qui ont été mes enseignants pour avoir su nous donner le nécessaire pendant ces deux dernières années ; recevez ma profonde gratitude et ma grande satisfaction ;
- Tous mes camarades de l'INE pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnées tout au long de notre formation ;
- A mon frère Maxime AHOUANDJINOUE pour son amour inconditionnel.

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

CEMS :	Copernics Emergency Management Service
CEMMPT :	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
DGeau :	Direction Générale de l'eau
GEV :	Valeur Extrêmes Généralisée
GloFAS :	Global Flood Awareness Système
KGE :	Kling Gupta Efficiency
NSE :	Nash Stedinger Efficiency
SAP :	Système d'Alerte Précoce
SAPI :	Système d'Alerte Précoce aux Inondations
TP :	Temps de Prévision
VS :	Visual Studio

RÉSUMÉ

Les inondations représentent l'un des défis majeurs auxquels sont confrontées de nombreuses régions à travers le monde, affectant les populations, les infrastructures et les écosystèmes. La présente étude a pour objectif de développer une interface graphique pour la prévision des inondations dans les bassins du Bénin. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé le framework Qt, le langage de programmation Python, les courbes de tarages et leurs inverses et les données de hauteur d'eau des stations hydrométriques des bassins du Bénin. Deux systèmes de prévision des inondations ont été implémentés; Il s'agit de SAPI-Q d'une part qui est basé sur la relation entre les débits des stations (propagation des ondes crues), les modèles conçus à cet effet sont des modèles statistiques obtenus à partir des régressions linéaires simples ou multiples et des auto-corrélations. Le système SAPI-G d'autre part est basé sur les prévisions GloFAS (Global Flood Awareness System) qui est l'un des systèmes opérationnels du service de gestion des urgences de la Commission Européenne, pour la prévision et le suivi des inondations dans le monde entier. Sur la base des performances montrées par les deux systèmes, une interface a été réalisée avec Qt Designer et le langage python a servi de back-end pour les fonctionnalités de l'interface.

Mots clés : inondations, interface, modèle, SAPI-Q, SAPI-G, GloFAS.

ABSTRACT

Flooding is one of the major challenges facing many regions around the world, affecting populations, infrastructures and ecosystems. The aim of this study was to develop a graphical interface for flood forecasting in Benin's watersheds. To achieve this objective, we used the Qt framework, the Python programming language, rating curves and their inverses, and water level data from a number of stations in the Ouémé basin. Two flood forecasting systems have been implemented : SAPI-Q is based on the relationship between station discharges (flood wave propagation), and the models designed for this purpose are statistical models obtained from simple or multiple linear regressions and auto-correlations. The SAPI-G system, on the other hand, is based on the GloFAS (Global Flood Awareness System) forecast, which is one of the operational systems of the European Commission's Emergency Management Service, for forecasting and monitoring floods worldwide. Based on the performance shown by the two systems, an interface was created using Qt Designer, and the python language was used as the back-end for the interface functionalities.

Keyword : floods, interface, model, SAPI-Q, SAPI-G, GloFAS.

Table des matières

	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Introduction	1
1 Contexte et justification	1
2 Objectifs du mémoire	2
2.1 Objectif général	2
2.2 Objectifs spécifiques	2
3 Questions de recherche	2
1 Révue de littérature	3
2 Présentation de la zone d'étude	6
1 Situation géographique	6
2 Grands ensembles du bassin	7
3 Matériels et Méthodes	9
1 Données utilisées	11
1.1 Données hydrométriques	11
1.2 Données de prévision disponibles dans le système GloFAS	11
2 Méthode relative à la mise en œuvre des modèles débit-débit et des prévisions du système GloFAS	12
2.1 Constitution du modèle de prévision débit-débit	12
2.2 Coefficient de corrélation	13
2.3 Evaluation du niveau de significativité de $r(X,Y)$	14
2.4 Reconstitution des courbes de tarages	15
2.5 Modèle de prévision du système GloFAS	15
2.5.1 Modèle hydrologique de GloFAS	15
2.5.2 Evaluation de la performance hydrologique en simulation simple des débits	16
2.5.3 Evaluation de la qualité prévisionnelle des inondations	16
3 Méthode relative à l'implémentation des systèmes (codage)	17

3.1	Python	17
3.2	PyQt5	18
3.3	Outils de développement : VS Code	18
3.4	Description de l'utilisation du système GloFAS	18
4	Méthode relative au développement de l'interface	19
4.1	Spécification des cas d'utilisation	19
4.2	Diagramme de classes	20
4.3	Outils de développement : Qt creator	20
4	Matériels et Méthodes	22
1	Résultats relatifs à la revue de littérature	22
1.1	Corrélation entre les débits des différentes stations de la zone d'étude	22
1.2	Modèles simplifiés de prévision débit-débit	23
1.3	Niveau d'alerte de prévision	26
1.4	Performance hydrologique du système GloFAS	27
1.5	Performance en prévision des inondations du système GloFAS	29
2	Résultats relatifs à l'élaboration des programmes	30
3	Interface du système de prévision des inondations	31
3.1	Description des options de l'interface	31
3.2	Prévision avec l'interface	34
3.2.1	Prévision avec SAPI-Q	34
3.2.2	Prévision avec SAPI-G	34
4	Création de l'exécutable	35
	Conclusion	36

TABLE DES FIGURES

2.1	Réseaux hydrographiques du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou . . .	8
3.1	Pourcentage de données manquantes	11
3.2	Débits par station de 2000 à 2020	12
3.3	Diagramme de cas d'utilisation	19
3.4	Diagramme de classe	20
3.5	Interface du framework Qt	21
4.1	Corrélation entre les débits de Zagnanando à t et de Bonou à t+3	23
4.2	Corrélation entre les débits de Save à t et Zagnanando à t+2	23
4.3	Performances en simulation des débits du système GloFAS en utilisant le KGE, NSE, RSR	27
4.4	: Courbes des débits observés et des prévisions brutes passées de GloFAS de 2000 à 2018 sur les temps de prévision (TP) de 1 à 12 jours pour station de Bonou . . .	28
4.5	: Courbes des débits observés et des prévisions brutes passées de GloFAS de 2000 à 2018 sur les temps de prévision (TP) de 1 à 12 jours pour station de Ahlan . . .	28
4.6	: Qualité prévisionnelle des inondations du système GloFAS pour différents temps de prévision (1 à 12 jours)	29
4.7	Fonctionnement de l'interface	30
4.8	Code d'extraction des débits sur le fichier NetCDF	30
4.9	Création d'une classe contenant tout le programme de l'interface	31
4.10	Interface du système de prévision des inondations	32
4.11	Prévision avec SAPI-Q à la station de Bonou avec l'interface autonome	34
4.12	Simulation avec SAPI-G à la station de Bonou	35

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Stations hydrologiques considérées	12
3.2	Tableau de contingence avec une présentation binaire	17
4.1	Description des options du système	33

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 Contexte et justification

Les inondations représentent l'un des défis majeurs auxquels sont confrontées de nombreuses régions à travers le monde, affectant les populations, les infrastructures et les écosystèmes. Le Bassin Versant de l'Ouémé, situé au Bénin, est caractérisé par une topographie variée, des sols souvent imperméables et un régime de précipitations variable. Ces facteurs, combinés à une urbanisation croissante et à une gestion des ressources en eau limitée, ont conduit à une augmentation des inondations dans la région. Au fil des années, les populations locales ont été confrontées à des pertes humaines, des dégâts matériels considérables, une dégradation des terres agricoles et des écosystèmes aquatiques fragilisés (DONOU, 2015). Il y a donc nécessité de développer des moyens d'adaptation adéquates pour réduire ses impacts sur l'homme, les biens, les services et l'écosystème. Parmi les mesures non-structurelles de réduction des risques d'inondation, la prévision est un facteur clé car permettant de disposer d'informations (avec un degré de fiabilité donnée) plusieurs jours à l'avance avant la survenue de l'évènement. Cette connaissance préalable pourrait être d'une grande utilité dans certaines conditions. Les avantages potentiels d'une information sur les prévisions d'inondation augmentent avec le délai de prévision. Dans le cadre de l'amélioration du système d'alerte précoce aux inondations (SAP) dans le bassin de l'Ouémé et son delta, il a été développé dans le langage R, une interface de système automatique de prévision qui, après avoir téléchargé les prévisions pour les douze prochains jours suivant la station choisie par l'utilisateur, corrige automatiquement ces prévisions si les observations du jour précédant sont fournies. Le système trace les prévisions brutes avec celles corrigées ainsi que les seuils correspondants aux divers niveaux d'alerte Jaune, Orange et Rouge (HOUNKPE et BOSSA, 2023). Cette interface développée dans R, oblige l'utilisateur à installer le langage de programmation R et Rstudio dans un premier temps. Il doit aussi télécharger et installer quelques packages avec possiblement des problèmes de correspondance entre les versions. Il s'avère donc nécessaire de développer un setup autonome sous forme .exe avec une interface conviviale.

Dans ce contexte, la présente étude vise à développer une interface conviviale de prévision des inondations facile à utiliser sans exécution d'un quelconque code et qui intègre les systèmes de prévision du projet-SAP dans le bassin de l'Ouémé, afin de mieux anticiper ces événements dévastateurs et de faciliter une gestion plus rapide et efficace des risques liés aux inondations dans ce bassin.

2 Objectifs du mémoire

2.1 Objectif général

L'objectif général de ce travail est de proposer une interface conviviale et facile à utiliser pour la prévision des inondations dans les bassins du Bénin

2.2 Objectifs spécifiques

Le travail vise spécifiquement à :

- Faire une revue de littérature sur les modèles Q-Q (débit-débit) et GloFAS en termes de formulation, performance et optimisation.
- Elaborer des programmes de prévision Q-Q et GloFAS sur les bassins versant du Bénin.
- Développer une interface graphique de prévision des inondations incluant les deux systèmes.

3 Questions de recherche

Pour répondre à ces besoins et résoudre le problème posé, cette recherche s'articulera autour des questions clés suivantes :

- Quelle est la meilleure approche de développement d'un programme de prévision débit-débit ?
- Quelle est la meilleure approche de développement d'un programme de prévision GloFAS ?
- Quelle approche adoptée pour concevoir une interface graphique de prévision incluant les deux systèmes ?

CHAPITRE

1

RÉVUE DE LITTÉRATURE

Les événements hydrologiques extrêmes, sont essentiellement les crues des cours d'eau suivies des inondations des plaines après un excédent pluviométrique ou des étiages à la suite de sécheresse pluviométrique. Les dernières décennies ont été caractérisées par une augmentation mondiale drastique de l'ampleur et de la fréquence des inondations (DONOU, 2015). Les pays d'Afrique de l'Ouest ont été touchés par un grand nombre d'événements extrêmes et ont subi de graves dégâts liés aux inondations (NNOMO, 2016). Selon (VISSIN, 2007), les crues fluviales surviennent lorsque le volume d'encaissement du cours d'eau est dépassé et déborde dans la plaine d'inondation en raison des pluies torrentielles dans les secteurs notamment en amont du cours d'eau. Leur avènement est parfois favorisé par les formes d'occupation du sol et les variations saisonnières de la végétation (DONOU, 2015).

Le bassin versant de l'Ouémé à Bonou et son delta détiennent environ la moitié de la superficie nationale (BIAO et al., 2016). Le delta est la zone tampon de l'ensemble de l'eau drainée avant qu'elle n'atteigne l'Océan Atlantique (6). En conséquence, le delta de l'Ouémé est inondé chaque année avec beaucoup de dommages et pertes sur les productions agricoles, les infrastructures et la vie humaine. Ainsi, la modélisation du débit de pointe dans le bassin versant de l'Ouémé présente un grand intérêt dans les processus de gestion des crues et des inondations.

L'analyse fréquentielle reconnue comme étant une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Elle est la méthode la mieux utilisée en hydrométéorologie pour estimer les extrêmes hydro-pluviométriques. Elle permet d'obtenir des estimations quand l'information hydrologique est disponible au site d'intérêt et est de bonne qualité (ALAMOU et al., 2014) .

L'analyse fréquentielle a été appliquée aux séries chronologiques des débits des stations de l'Ouémé et son delta; et affirme que la loi GEV (Valeurs Extrêmes Généralisées), utilisée à un intervalle de confiance de 95% ajuste bien les débits maximaux des stations de Athiémé, Malanville, Bétérou, Savè, Zagnanando et Atchérigbé, tandis que la loi de Gumbel, utilisée à un intervalle de confiance de 95% ajuste bien les maximaux des stations de Bonou et Domè

(ALAMOU et al., 2014). Dans ce même travail, les auteurs montrent une autocorrélation entre les débits des stations ; ce qui permet de modéliser le débit de ces stations en fonction des débits des autres stations qui sont corrélés avec celle-ci lorsqu'elles sont disponibles.

(BOKO et ADJOVI, 2018) ont détecté trois sous périodes dans la série des débits associés au 90ème, 95ème et 99ème percentile dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou. Il s'agit des sous-périodes (1951-1968, 1969-1987 et 1988-2015). Selon les auteurs, les première et troisième sous-périodes sont des périodes très humides contrairement à la deuxième où il y a eu une régression de ces débits. Dans la même étude, ils observent que les débits maximaux en 24 heures augmentent en même temps que les périodes de retour. Les débits maximaux de 50ème quantile surviennent chaque deux ans ; les débits maximaux correspondants aux événements hydrologiquement forts, surviennent tous les 10 ans et les débits extrêmement forts ont une occurrence centennale. Les changements hydrologiques peuvent être causés par l'augmentation des événements pluvieux extrêmes (SIGHOMNOU et al., 2013), les changements dans l'utilisation des terres et la couverture terrestre (MAMADOU et al., 2015) et la rupture des bassins endoréiques (DESCROIX et al., 2018).

Parlant de la prévision des inondations, le système mondial de sensibilisation aux inondations (Global Flood Awareness System en anglais ; GloFAS) est produit par le CEPMMT dans le cadre du service de gestion des urgences Copernicus (CEMS en anglais) et fournit des prévisions opérationnelles d'inondation à longue portée avec un délai de 30 jours pour les principaux bassins fluviaux mondiaux, y compris le Brahmapoutre au Bangladesh (ALFIERI et al., 2013).

GloFAS est un système probabiliste mondial fournissant des prévisions de débits partout dans le monde, avec des informations sur les crues publiées chaque jour sur plus de 2000 points de report (Alfieri et al., 2013). Pour anticiper les inondations à venir, le centre de prévision et d'alerte aux inondations au Bangladesh analyse désormais régulièrement les informations disponibles auprès de GloFAS sur le moment et la durée des inondations potentielles à la suite d'un projet pilote réussi lors des inondations de 2017. Au Bangladesh, lors des inondations de 2020 le service de prévision a utilisé les prévisions de GloFAS pour avertir la population à l'avance du risque d'inondations potentielles (RENET, 2014). Sur le plan national, le Niger a utilisé GloFAS pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation dans les villages exposés pour les inondations de 2020.

Les modèles hydrologiques jouent un rôle clé dans la prévision des événements extrêmes comme la sécheresse et l'inondation. Afin de réduire les incertitudes lors du calibrage des modèles, une approche d'ensemble de modélisation se développe aujourd'hui avec des résultats satisfaisants. Cela améliore le modèle de représentation des débits de la rivière. En effet, un assemblage des modèles performants en période de hautes eaux et d'autres en période de basses eaux, s'est montré mieux adapter que l'utilisation d'un seul modèle (GABA et al., 2015). L'auteur explique qu'une telle approche est préférable dans la modélisation des extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé. Lors de l'utilisation d'une approche d'ensemble de modélisation, l'ensemble moyen est plus efficace que l'ensemble médian aux alentours de régions sahéliennes (GABA et al., 2015). C'est donc l'ensemble moyen qui est retenu.

Parmi les modèles déjà expérimentés avec de bons résultats dans le bassin de l'Ouémé, HBV et HEC-HMS sont deux modèles semi-distribués gratuits, flexibles et offrent l'avantage de simuler des événements uniques et continus (GABA et al., 2015). De plus, ModHyPMA est un modèle global composé de deux paramètres et est déjà utilisé dans le bassin de l'Ouémé avec de bons résultats sur le bassin versant (BIAO, 2017). Les modèles pluie-débit (GR4J, ModHyPMA,

HBV, HEC-RAS), les modèles débit-débit (méthode basée sur la propagation des ondes de crue) et le système GloFAS ont montré de bonnes performances en matière de la prévision des inondations dans le bassin de l'Ouémé et son delta. Ainsi une utilisation de ces outils intégrés dans une interface graphique bien appropriée, peut servir les structures en charge de la gestion des inondations et les autorités.

2

CHAPITRE

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Contenu

1	Situation géographique	6
2	Grands ensembles du bassin	7

1 Situation géographique

Le bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou est compris entre 10°12' et 7°58' de latitude nord et 1°35' et 3°05' de longitude est avec un léger débordement à l'est vers le Nigéria (BOKO et ADJOVI, 2018). Le secteur d'étude est à cheval sur les départements de la Donga, du Borgou, des Collines, du Zou, de l'Ouémé et du Plateau et compte en son sein 38 communes, soit 49,35% des 77 communes du Bénin. Avec ses affluents, dont le Zou et l'Okpara, il couvre une superficie de 46,990 km² répartis d'une part sur le socle Dahoméyen, partie supérieure du bassin, et d'autre part sur les formations sédimentaires du bassin côtier, appelé l'Ouémé inférieur (BOKO et ADJOVI, 2018). La diversité de ces substratums géologiques influence directement ou indirectement la manifestation des événements extrêmes hydroclimatiques (VISSIN, 2007).

Le fleuve Ouémé prend sa source dans les monts Tanéka à 550 m d'altitude et coule d'abord vers l'est sur 70 km, puis vers le sud jusqu'à Cotonou sur 580 km (BOKO et ADJOVI, 2018). En amont, il reçoit de nombreux affluents sur ses deux rives. Il est rejoint à l'est par la rivière de l'Okpara, dont le cours d'eau lui est parallèle avec débordement sur le Nigéria, et à l'ouest le Zou, qui s'étend légèrement sur le territoire togolais (ADAM et BOKO, 1993).

2 Grands ensembles du bassin

Le fleuve Ouémé développe une zone deltaïque sur 95 km de longueur jusqu'à la lagune de Cotonou. Sur la rive droite du delta, un petit affluent de la Sô prend naissance dans la dépression de la Lama, traverse les marais et le lac Hlan, circule parallèlement à l'Ouémé et en reçoit les déversements latéraux pendant les hautes de l'Ouémé avant de se déverser dans le lac Nokoué. Le bassin versant de l'Ouémé et ses affluents couvrent une superficie de 46,990 km², tandis que la partie deltaïque occupe une superficie de 9,000 km² (BOKO et ADJOVI, 2018). Ces différentes entités sont réparties dans l'Ouémé supérieur et l'Ouémé inférieur. Cependant, l'Ouémé supérieur est scindé en trois, dont le réseau de la rive gauche, le réseau nord-ouest et le bassin du Zou (ADAM et BOKO, 1993). Quant à l'Ouémé inférieur, il prend en compte l'exutoire de Bonou, qui est en amont de la zone deltaïque.

- **Réseau rive gauche** : Les rivières ici suivent la direction nord-sud imposée par les formations du socle. Les pentes sont relativement importantes (1 à 2 m/km) et peuvent s'accroître au passage d'accidents géologiques. Les affluents les plus importants de cette rive sont l'Alpouro (2010 km² pour une longueur de 86 km), le Yérou Marou (2590 km² pour une longueur de 120 km), la Beffa (1990 km² pour une longueur de 78 km), l'Okpara plus de 10,000 km² dont la longueur est de 362 km.
- **Réseau nord-ouest** : Son réseau hydrographique est très dense et s'étale sur les flancs des massifs de l'Atacora au nord et d'Alédjo à l'ouest. Les rivières suivent les directions imposées par les reliefs, dont ouest/est et nord-ouest/sud-est avant de rejoindre l'Ouémé. Les pentes sont également très élevées et restent toujours relativement fortes (1 à 2 m/km). D'amont en aval, les rivières les plus importantes, l'Ouémé jusqu'à sa confluence avec l'Alpouro sur le parcours de Affon (4320 km² pour une distance de 152 km), la Donga (1285 km² pour une longueur de 74 km), la Wewé (617 km² pour longueur de 49 km), la Térrou (3320 km² pour une longueur de 139 km), l'Odola (1076 km² pour une longueur de 74 km) et l'Adjiro (2151 km² pour une longueur de 160 km).
- **Bassin du Zou** : Il est séparé du réseau nord-ouest par un alignement de relief d'axe ouest passant à la latitude de Bantè. Dans cette direction, il va d'abord être constitué de deux axes parallèles. Le Zou (8440 km² pour 250 km) et l'Agbado (2703 km² pour 109 km). Ils suivent tous les deux une direction N-S puis NW-SE. Après 120 km de parcours, le Zou longe sur 15 km les collines quartzitiques de Badagba avant de les traverser, reçoit l'Agbado et suit une direction NNW-SSE pour rejoindre l'Ouémé plus loin sur 107 km. Les pentes du lit du cours sont relativement importantes sur les 10 premiers kilomètres et deviennent très modérées (inférieur à 1 m/km). Le bassin du Zou a aussi ses affluents, dont l'Otio (442 km²), la Bogui (450 km²), le Kouffo (806 km²) et l'Agbla (479 km²).
- **Ouémé inférieur** : Après sa confluence avec le Zou, l'Ouémé entaille profondément les formations du Continental Terminal. La pente de la rivière devient alors extrêmement faible (5 m de dénivelée sur 85 km), et la vallée de l'Ouémé se présente alors comme une large zone inondable où le système hydrographique est fort complexe.

La figure suivante montre le réseau hydrographique de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

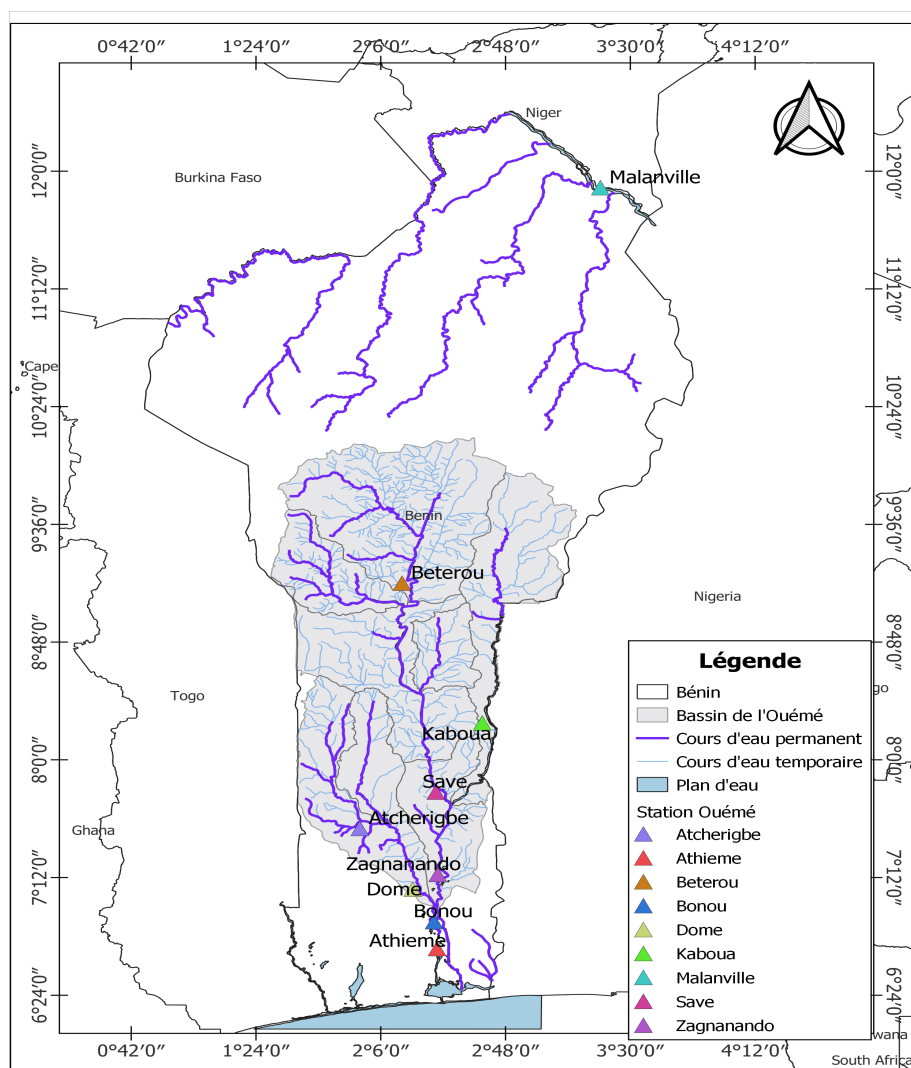


FIGURE 2.1 – Réseaux hydrographiques du bassin-versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

CHAPITRE

3

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Contenu

1	Données utilisées	11
1.1	Données hydrométriques	11
1.2	Données de prévision disponibles dans le système GloFAS	11
2	Méthode relative à la mise en œuvre des modèles débit-débit et des prévisions du système GloFAS	12
2.1	Constitution du modèle de prévision débit-débit	12
2.2	Coefficient de corrélation	13
2.3	Evaluation du niveau de significativité de $r(X,Y)$	14
2.4	Reconstitution des courbes de tarages	15
2.5	Modèle de prévision du système GloFAS	15
2.5.1	Modèle hydrologique de GloFAS	15
2.5.2	Evaluation de la performance hydrologique en simulation simple des débits	16
2.5.3	Evaluation de la qualité prévisionnelle des inondations	16
3	Méthode relative à l'implémentation des systèmes (codage)	17
3.1	Python	17
3.2	PyQt5	18
3.3	Outils de développement : VS Code	18
3.4	Description de l'utilisation du système GloFAS	18
4	Méthode relative au développement de l'interface	19

4.1	Spécification des cas d'utilisation	19
4.2	Diagramme de classes	20
4.3	Outils de développement : Qt creator	20

1 Données utilisées

Nous avons acquis les données de débit journalier des stations hydrométriques du Bénin dont les données sont disponibles et où les prévisions sont effectuées actuellement avec le système d'alerte précoce de la DGeau. Ces données couvrent la période de 2000 à 2023.

1.1 Données hydrométriques

Les données hydrométriques ont été minutieusement traitées (Elimination des années avec beaucoup de lacune) en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes. La Figure 3.1 présente le pourcentage de données manquantes par station durant la période d'étude après avoir supprimé les données aberrantes. Les stations de Bétérou et Domè présentent les minimums de données manquantes pendant que les stations Atchakpa et Kaboua présentent les plus grands nombres de données manquantes. La figure 3.2 présente les débits.

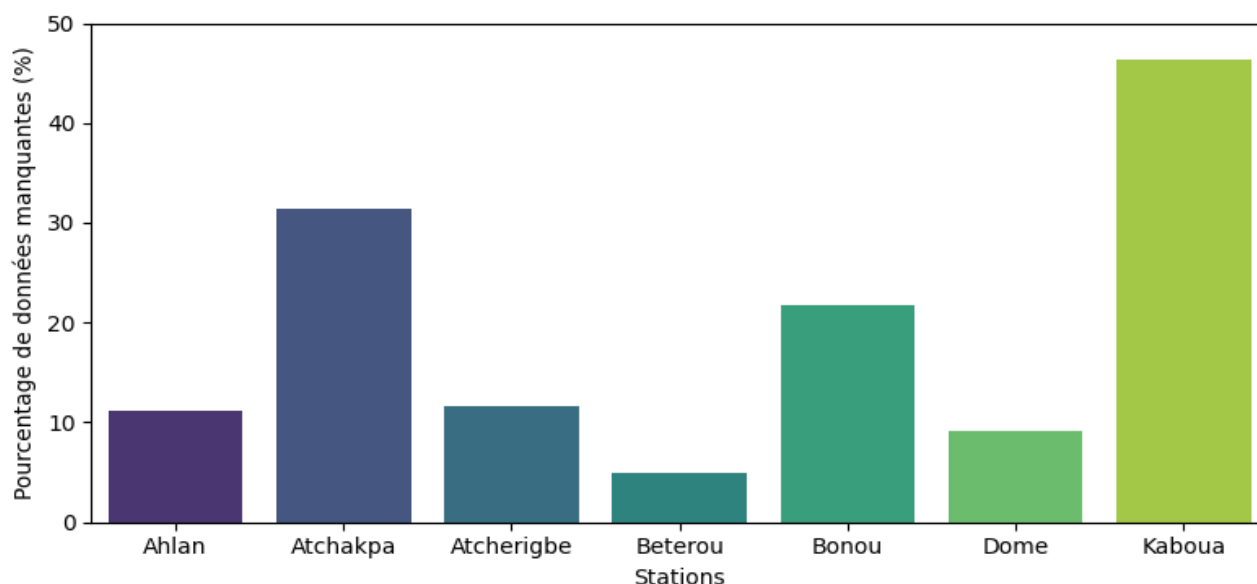


FIGURE 3.1 – Pourcentage de données manquantes

1.2 Données de prévision disponibles dans le système GloFAS

Les données de GloFAS, Version 4, sont disponibles du 3 janvier 1999 au 31 décembre 2023 avec une résolution horizontale $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. Les prévisions passées sont initialisées à 00 UTC deux fois par semaine avec un pas de temps de 24 heures et un délai de 46 jours. Les prévisions passées sont des prévisions exécutées sur des dates passées, et celles présentées ici sont utilisées pour fournir une période suffisamment longue par rapport à laquelle la performance de la prévision opérationnelle en temps réel de 30 jours peut être évaluée. Les prévisions passées sont initialisées deux fois par semaine avec des délais allant jusqu'à 46 jours, par pas de 24 heures pendant 20 ans dans l'histoire récente.

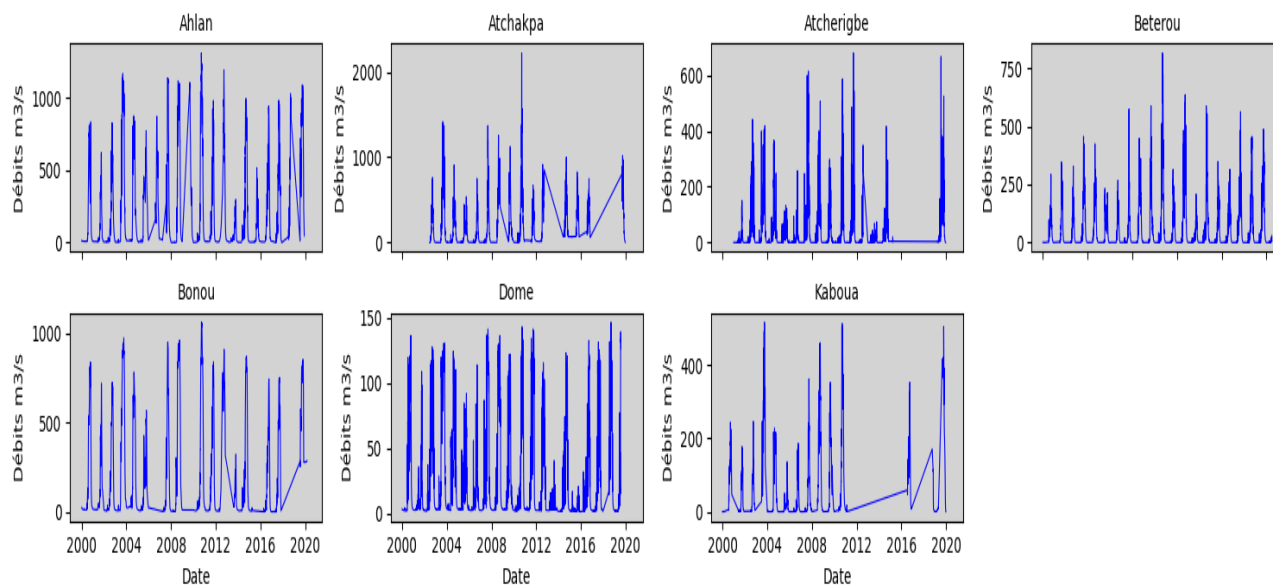


FIGURE 3.2 – Débits par station de 2000 à 2020

Les données de débits étant spatialement maillées, on peut extraire les débits d'une station quelconque à partir de ces coordonnées pour autant que la superficie du bassin amont est supérieure à 2000 km². Ainsi donc, les stations du bassin du Bénin dont les superficies sont plus grandes que 2000 km² avec des données de débits disponibles sont sélectionnées et présentées dans le Tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Stations hydrologiques considérées

Code	Station	Rivière	Longitude	Latitude	Superficie [km ²]
7055614	Athiémé	Mono	2.47	6.72	25000
7058480	Zagnanando	Ouémé	2.47	7.22	38167
7056809	Savè	Ouémé	2.46	7.78	23491
7057366	Atchérigbé	Zou	2.03	7.53	7035
7052993	Bétérou	Ouémé	2.27	9.2	10083
7059107	Bonou	Ouémé	2.45	6.9	49285
7058835	Domè	Zou	2.33	7.12	4083
7055615	Kaboua	Okpara	2.72	8.25	9464
7055616	Malanville	NIGER	3.383	11.888	8546

2 Méthode relative à la mise en œuvre des modèles débit-débit et des prévisions du système GloFAS

2.1 Constitution du modèle de prévision débit-débit

Pour la prévision des crues, les modèles conçus sont des modèles statistiques obtenus à partir des régressions linéaires simples ou multiples et des auto-corrélations. Les modèles statistiques, ou

modèles régressifs sont des relations statistiques entre les variables de débit et leur déroulement temporel. Ces modèles font appel aux méthodes statistiques pour faire ressortir les relations entre les sollicitations et les réponses tout en accordant un intérêt secondaire aux processus physiques du système. Les modèles de régression et corrélation établissent des relations fonctionnelles à l'aide des données expérimentales et les quantifient en termes de coefficient de corrélation ou de détermination, d'intervalles de confiance et tests de significativité (ALAMOU et al., 2014). Dans ce type de modèle, les données utilisées sont de forme discrète avec des intervalles de discrétisation τ choisis au préalable. Le débit à prédire $Q(t)$ est expliqué en fonction des débits $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ observés aux temps $t - \tau_1, t - \tau_2, \dots, t - \tau_n$. On peut formuler un modèle régressif, en débit, de la façon suivante :

$$Q(t) = a_0 + a_1 Q(t - \tau_1) + a_2 Q(t - \tau_2) + \dots + a_n Q(t - \tau_n) \quad (3.1)$$

Afin d'estimer le degré de fiabilité de la prévision, les coefficients de corrélations ou de détermination entre les débits sont calculées. A ce coefficient on a associé la valeur-p (en anglais p-value) qui permet d'évaluer son niveau de significativité.

2.2 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation entre deux champs X et Y , noté $r(X, Y)$, est un critère de performance statistique définie en fonction de la covariance entre deux variables. Ce critère prend les valeurs allant de -1 à 1 permettant d'évaluer la dépendance entre les deux champs, cette dépendance est d'autant plus forte que le coefficient fourni est en valeur absolue est proche de 1. Nous calculons des coefficients de corrélation de type $r(X(t - \tau_n), Y(t))$, où τ_n représente le retard du champ Y par rapport au champ X . Les maxima des courbes de corrélation donnent une indication sur la valeur optimale du retard sans pour autant le déterminer de façon certaine. Cette donnée intervient dans la définition des horizons de prévision et donne une indication sur le temps de propagation. On désigne par E l'espérance mathématique et par Var la variance d'une variable aléatoire. La formule du coefficient de corrélation entre deux variables X et Y s'écrit :

$$r(X, Y) = \frac{E((X - EX)(Y - EY))}{\sqrt{Var(X) \cdot Var(Y)}} \quad (3.2)$$

Ce temps de propagation a permis de concevoir, grâce à une régression simple ou multiple ou une auto-corrélation selon le cas, le modèle de prévision de débit du cours d'eau à une station donnée en fonction des données d'observation de la station (ou des stations) en amont qui l'alimente(nt). En cas d'absence de données d'observations de station en amont, auto-corrélation a permis d'expliquer le débit d'une date t de la station à étudier à l'aide certains débits observés des dates antérieures. Le schéma ci-après montre la relation (sens de l'écoulement) entre les différentes stations.

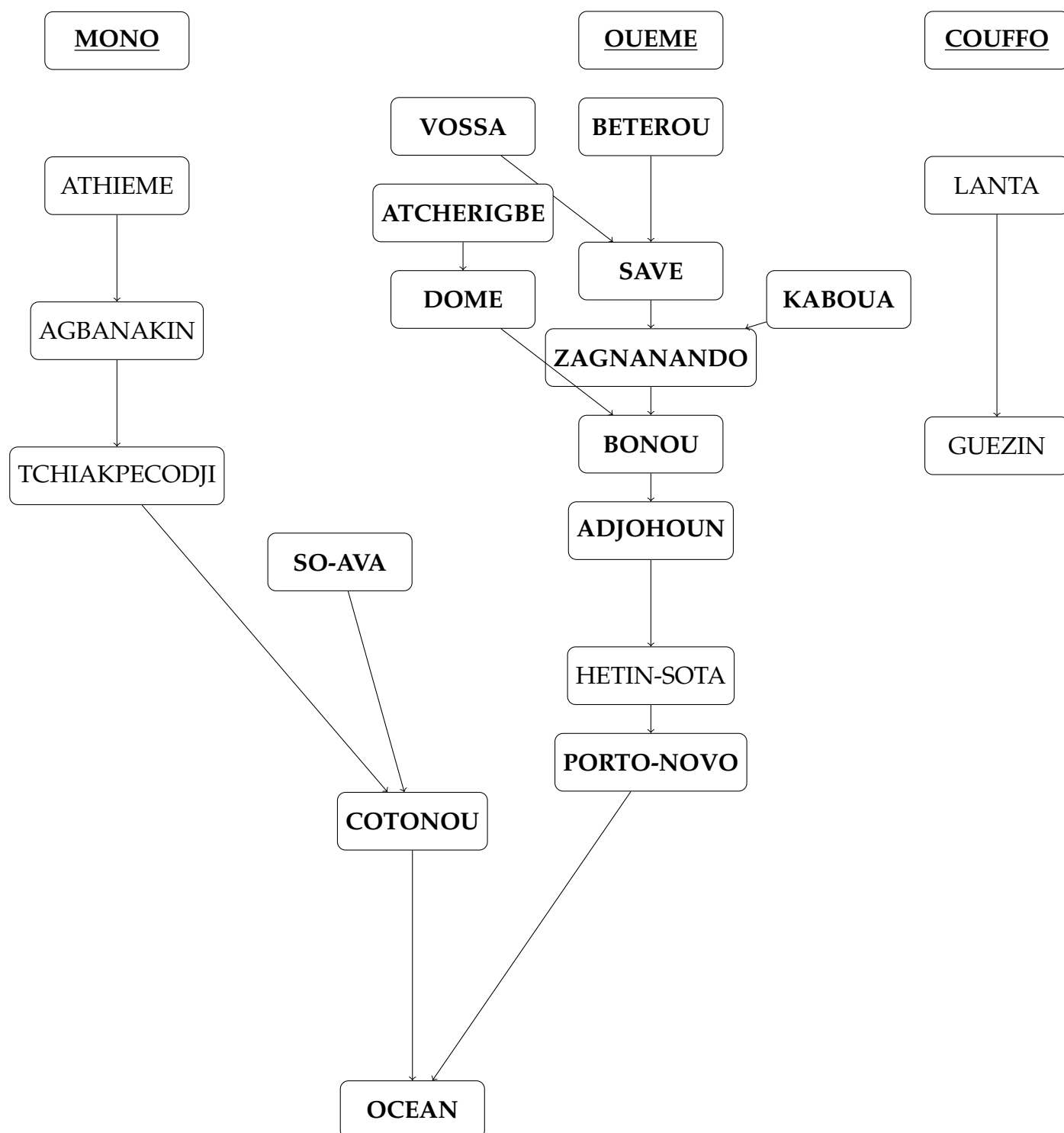


Diagramme montrant hiérarchie des stations hydrométriques : source (ZANNOU, 2014)

2.3 Evaluation du niveau de significativité de $r(X, Y)$

La valeur-p (p-value) est utilisée en statistiques inférentielles pour conclure sur le résultat d'un test statistique. La procédure généralement employée consiste à comparer la valeur-p à un seuil préalablement défini (traditionnellement 5%). Si la valeur-p est inférieure à ce seuil, on rejette l'hypothèse nulle en faveur de l'hypothèse alternative, et le résultat du test est déclaré

« statistiquement significatif ». Dans le cas contraire, si la valeur-p est supérieure au seuil, on ne rejette pas l'hypothèse nulle, et on ne peut rien conclure quant aux hypothèses formulées. Dans cette approche, la valeur-p est considérée comme une mesure d'à quel point les données plaident contre l'hypothèse nulle.

2.4 Reconstitution des courbes de tarages

Dans la même étude, l'auteur a établi la relation entre les débits et les hauteurs d'eau observées : c'est la courbe de tarage. Il fait un ajustement de type polynomial pour obtenir l'équation de la courbe de tarage par une équation de la forme (3.2). Ce qui va permettre de retrouver la valeur du débit Q (en m^3/s) en fonction de la hauteur H (en cm) lue sur l'échelle limnimétrique.

$$Q = aH^2 + bH + c \quad (3.3)$$

Ainsi connaissant la courbe de tarage (3.3) et la valeur du débit (Q), on retrouve la hauteur (H) grâce à l'équation :

$$H = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - Q)}}{2a} \quad (3.4)$$

avec H positif

2.5 Modèle de prévision du système GloFAS

Le modèle de prévision précédemment (modèle débit-débit) conçu est un modèle statistique local qui est basé sur la relation entre les débits d'une station et de(s) station(s) en amont(s) qui l'alimente(nt). Ce modèle ne tient pas compte du processus physique du système hydrologique. Le système GloFAS est un système opérationnel planétaire pour la prévision d'ensemble des crues, fruit d'un partenariat entre le CEPMMT, le Centre commun de recherche de la Commission européenne et l'université de Reading (ALFIERI et al., 2013).

Le système est basé sur un modèle distribué qui prends en compte les états de surface, la pente, la végétation etc. GloFAS produit des estimations probabilistes des débits pour la planète entière à une résolution de $0,1^\circ$ (environ 11 km au niveau de l'Équateur) et est alimenté par le système de prévision d'ensemble du CEPMMT pour calibrer le modèle hydrologique et pour définir les seuils de crue utilisés. Ce système de forçages météorologique compte 51 membres (c'est-à-dire de multiples réalisations à partir d'un seul système de prévision météorologique numérique) avec des délais de prévision de 0 à 45 jours. Les 15 premiers jours incluent les prévisions de précipitations, tandis que les suivants correspondent uniquement à des données sur le tracé des cours d'eau. Les prévisions probabilistes des crues sont accessibles gratuitement sur le site (<https://www.glofas.eu>)

2.5.1 Modèle hydrologique de GloFAS

Plusieurs modèles hydrologiques sont utilisés dans GloFAS. Il s'agit de HTESSEL (BALSAMO et al., 2009), LISFLOOD -routage des canaux et LISFLOOD (BATES et al., 2005). LISFLOOD est un modèle d'acheminement des pluies-débit-routage spatialement distribué. Il a été développé

pour la première fois au Centre européen de recherche en 2000 et est utilisé pour la prévision opérationnelle des crues à l'échelle paneuropéenne. A partir de la version 3.1, il est également utilisé comme modèle hydrologique principal dans GloFAS. Inspiré par les données de forçage météorologique (de précipitations, de température, d'évapotranspiration potentielle et de taux d'évaporation pour les surfaces d'eau libre et de sol nu), LISFLOOD calcule un bilan hydrique complet (pour GloFAS à un pas de temps quotidien) pour chaque cellule de la grille du domaine. Le ruissellement produit au niveau de chaque cellule de la grille est acheminé à travers le réseau fluvial en utilisant une approche par ondes cinématiques. Le modèle comprend également des options pour simuler des lacs, des réservoirs et des prélèvements d'eau. LISFLOOD est codé à l'aide du langage de programmation Python et d'une extension PCRaster Python. LISFLOOD et ses outils associés sont tous open-source.

2.5.2 Evaluation de la performance hydrologique en simulation simple des débits

Les performances en simulation des débits des systèmes ont été évaluées avec les critères ordinairement utilisés en modélisation hydrologique tels que le KGE (GUPTA et al., 2009), le NSE (NASH, 1970), le pourcentage absolu du biais (APB) et le RSR. Le KGE (l'efficacité de Kling et Gupta) est un critère pénalisant une mauvaise simulation des débits extrêmes. Le RSR détecte l'erreur moyenne systématique absolue de prévision après une pénalisation des erreurs importantes, tandis que le NSE est une statistique normalisée qui détermine l'ampleur résiduelle de la variance résiduelle par rapport à la variance de données mesurée. Le KGE comme le NSE varie de l'infini négatif à 1 ($]-\infty, 1]$) avec les valeurs proches de 1 indiquant une très bonne reproduction des débits observés par le système. L'APB indiquant l'erreur absolue en pourcentage de la simulation varie de 0 à 100 avec les valeurs proches de zéro indiquant de parfaites simulations et les valeurs inférieures à 25 indiquant des simulations acceptables. Il en est de même pour les valeurs de RSR inférieure à 0.75. Les très bonnes simulations ont des RSR proches de zéro.

2.5.3 Evaluation de la qualité prévisionnelle des inondations

L'évaluation de la performance prévisionnelle des deux systèmes consiste à déterminer l'aptitude des deux systèmes à reproduire les débits au-delà d'un seuil donné. La procédure utilisée consiste à :

- Catégoriser les variables (débits observés et débits simulés) en les comparants avec la deuxième tercile calculé à chaque fois avec les débits observés pris comme référence. Il a donc été évalué l'aptitude des systèmes à prédire les débits au-delà de la deuxième tercile.
- Etablir le tableau de contingence indiquant le nombre de succès, d'événements manqués, de fausses alertes et de rejets corrects pour nombre suffisant de cas.
- Calculer des indices à partir du tableau de contingence.
- **Probabilité de détection (POD) ou taux de succès (HR)**

$$POD = HR = \frac{a}{a + c} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Le taux de succès (Hit Rate) est un indicateur basé sur les observations a et c . Il est le rapport entre le nombre d'événements prédits avec succès et le total des événements

TABLE 3.2 – Tableau de contingence avec une présentation binaire

Phénomène prévu	Phénomène observé		Total marginal
	OUI	NON	
OUI	a	b	a + b
NON	c	d	c + d
Total marginal	a + c	b + d	a + b + c + d = n

observés et varie de 0 à 100 avec des valeurs proches de 100 correspondants à des prévisions presque parfaites. Cependant, le POD ne fait aucunement cas des fausses alertes qui peuvent s'avérer importantes. POD doit être interprété conjointement avec son complément qui est le rapport de fausses alertes

- **Rapport de fausses alertes (FAR)**

$$FAR = \frac{b}{a + b} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Le rapport de fausses alertes est le rapport entre le nombre de fausses alertes et les événements prévus au total. Il oscille entre 0 et 100 avec 0 la valeur optimale. Cet indice est indépendant de nombre d'événements manqués et doit donc être interprété simultanément avec le taux de réussite.

- **Ratio de vraisemblance (RV)**

$$RV = \frac{POD}{FAR} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Le ratio de vraisemblance est le rapport entre le taux de succès et le rapport de fausses alertes. Il permet de contrer les insuffisances relevées plutôt pour les deux indices précédant. Le ratio de vraisemblance indique à quel point il est plus (ou moins) probable qu'une alerte ait été émise avant un événement qu'avant un non-événement.

3 Méthode relative à l'implémentation des systèmes (codage)

Cette partie est consacrée à la méthodologie relative à l'élaboration des programmes (implémentation) de prévision débit-débit et GloFAS pour le fonctionnement de l'interface. Avant d'aborder l'implémentation nous allons présenter les outils et technologies utilisés.

3.1 Python

Python est un langage de programmation de haut niveau, interprété, polyvalent et orienté objet. Il a été créé par Guido van Rossum et a été publié pour la première fois en 1991. Depuis lors, Python est devenu l'un des langages de programmation les plus populaires et largement utilisés dans le monde entier. Python est généralement considéré comme un langage interprété, ce

qui signifie que le code source est exécuté directement par un interpréteur Python. Il est un langage orienté objet, ce qui signifie que presque tout en Python est un objet avec ses attributs et méthodes. L'encapsulation, l'héritage et le polymorphisme sont pris en charge, permettant une programmation orientée objet efficace. Python possède une bibliothèque standard étendue qui fournit des modules et des packages pour effectuer une grande variété de tâches, des opérations de base aux fonctionnalités avancées telles que l'analyse de données, le traitement du texte, les opérations réseau, etc. Cela facilite le développement rapide des applications. Il est utilisé dans une grande variété d'applications, telles que le développement web (Django, Flask), l'analyse de données (Pandas, NumPy), l'intelligence artificielle (TensorFlow, PyTorch), l'automatisation, les applications de bureau (PyQt), les jeux vidéo, les sciences et l'ingénierie, et bien plus encore. Dans ce travail il a été utilisé pour servir de back-end pour notre interface, c'est-à-dire faire la liaison entre les différents widgets qui ont générés l'interface graphique avec principalement les modules (PyQt5, NumPy, Pandas, Matplotlib, Tkinter, NetCDF, Xarray...)

3.2 PyQt5

PyQt5 est une bibliothèque Python qui offre des liaisons (bindings) à la bibliothèque de développement d'interfaces graphiques Qt, développée par The Qt Company. Cela a permis aux développeurs Python de créer des applications graphiques multiplateformes sophistiquées en utilisant la puissance de Qt et les avantages de Python. PyQt5 fournit des liaisons complètes pour l'ensemble des fonctionnalités de Qt, offre un accès total à la puissance et les capacités aux capacités de Qt depuis Python. Cela inclut les composants d'interface utilisateur, les fonctionnalités, les opérations de fichiers, les bases de données, etc. Ensuite il fournit également des classes Python correspondant aux composants d'interface utilisateur de Qt, comme les boutons, les fenêtres, les boîtes de dialogue, les zones de texte, les tableaux, etc. Ces composants peuvent être utilisés pour les utilisateurs d'interfaces interactives et esthétiquement attrayantes. Il offre une intégration étroite avec Qt Designer, un outil de conception d'interfaces graphiques permettant de créer des interfaces utilisateur en glisser-posser. Les fichiers de conception de coréelles par Qt Designer peut être chargés directement dans PyQt5. Dans notre étude, cela a été utilisé pour charger le fichier de l'interface créer dans Qt designer directement dans python afin d'utiliser les différentes classes nécessaires pour la liaison des widgets.

3.3 Outils de développement : VS Code

Visual Studio Code, souvent abrégé en VS Code, est un éditeur de code source léger, extensible et open-source développé par Microsoft. Il est largement utilisé par les développeurs de logiciels pour la programmation, le développement d'applications web, la création de scripts, la gestion de projets, et bien plus encore. VS Code est un environnement de développement intégré (IDE) moderne qui offre beaucoup de fonctionnalités pour rendre fluide le développement.

3.4 Description de l'utilisation du système GloFAS

D'abord GloFAS est une plateforme web internationale disponible pour la prévision des inondations dans le monde. Avant toute utilisation, l'utilisateur doit créer un compte et confirmer son compte. Une fois le compte est créé, il a la possibilité de :

- Visualiser les informations sur la météorologie mondiale, l'hydrologie, risque des inondations, l'évaluation des évènements
- Visualiser les cartes des risques d'inondations sur le plan mondial
- Télécharger les données de prévision et la carte des risques d'inondations

Avant de pouvoir télécharger les données de prévision, l'utilisateur doit spécifier la date à laquelle il souhaite voir les prévisions. Ainsi le téléchargement est lancé et à la fin il récupère un fichier netCDF zippé qui est un fichier en quatre dimensions et comporte : la latitude, la longitude, le temps et les débits journaliers sur le plan mondial. Ce fichier téléchargé sera de-zippé et importé dans python avec la bibliothèque netCDF4 et servira à des fins de programmations pour le fonctionnement du système GloFAS dans notre interface.

4 Méthode relative au développement de l'interface

4.1 Spécification des cas d'utilisation

Avant de développer un système, il faut savoir précisément à QUOI il devra servir, c'est-à-dire à quels besoins il devra répondre. La modélisation des besoins permet de faire l'inventaire des fonctionnalités attendues ; organiser les besoins en eux de manière à faire apparaître les relations. Avec UML (Unified Modelling Language) on modélise les besoins au moyen du diagramme de cas d'utilisation.

- Un **cas d'utilisation** est un service rendu à l'utilisateur, il implique des séries d'action plus élémentaires.
- Un **acteur** est une entité extérieure au système modélisé et qui interagit directement avec lui. Les acteurs impliqués dans un cas d'utilisation sont liés par une association.

La figure 3.3 suivante présente le diagramme de cas d'utilisation de notre système de prévision. Il présente les fonctionnalités de notre système action par action.

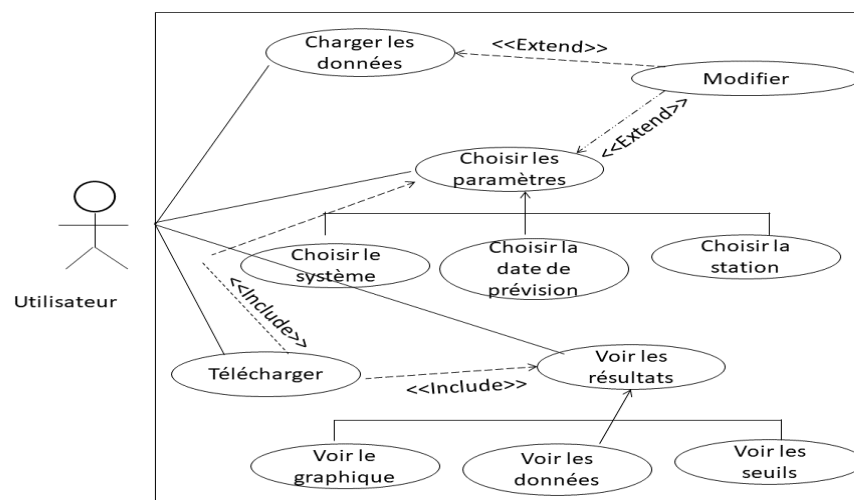


FIGURE 3.3 – Diagramme de cas d'utilisation

4.2 Diagramme de classes

Une classe est une description d'un groupe d'objets partageant un ensemble commun de propriétés (les attributs), de comportements (les opérations ou méthodes) et de relations avec d'autres objets (les associations et les agrégations). Les diagrammes de classes permettent de spécifier la structure et les liens entre les objets dont le système est composé. La figure 3.4 suivante présente le diagramme de classe de notre système de prévision.

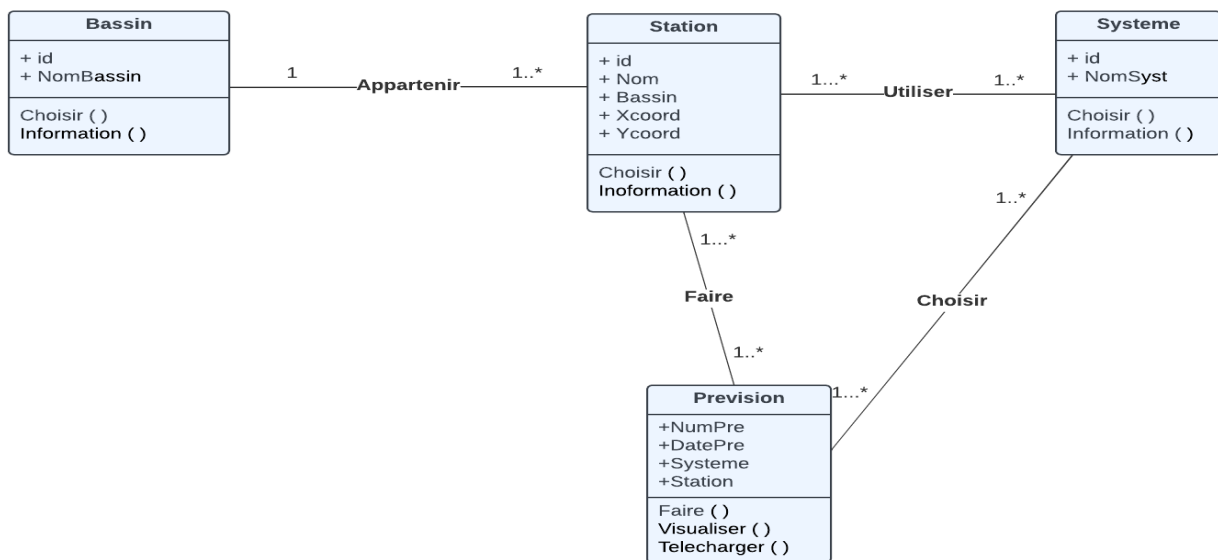


FIGURE 3.4 – Diagramme de classe

4.3 Outils de développement : Qt creator

Qt est un framework de développement d'applications multiplateformes populaires pour la création des applications graphiques et interactives. Développé par la société finlandaise The Qt Company et la communauté open source, Qt offre un grand éventail d'outils et de fonctionnalités pour développer des applications pour les plateformes, y compris les systèmes d'exploitation Windows, Linux, macOS, Android et iOS.

Qt Creator est un environnement de développement intégré multiplateformes faisant partie du framework Qt. Il intègre directement dans l'interface un débogueur, un outil de création d'interfaces graphiques, des outils pour la publication de code sur Git et Mercurial ainsi que la documentation Qt. L'éditeur de texte intégré permet l'auto-complétion ainsi que la coloration syntaxique. Qt Creator utilise sous Linux le compilateur gcc. Il peut utiliser MinGW ou le compilateur de Visual Studio sous Windows. Qt Designer est un outil graphique puissant et convivial fourni avec le framework Qt. Il permet aux développeurs de créer des interfaces utilisateur pour leurs applications Qt en utilisant une interface visuelle de type glisser-déposer. Il est étroitement intégré avec le framework Qt, ce qui signifie que les développeurs peuvent créer des interfaces utilisateur en utilisant des composants standard de Qt. L'interface de prévision proposée a été créée avec cet outil qu'est Qt designer.

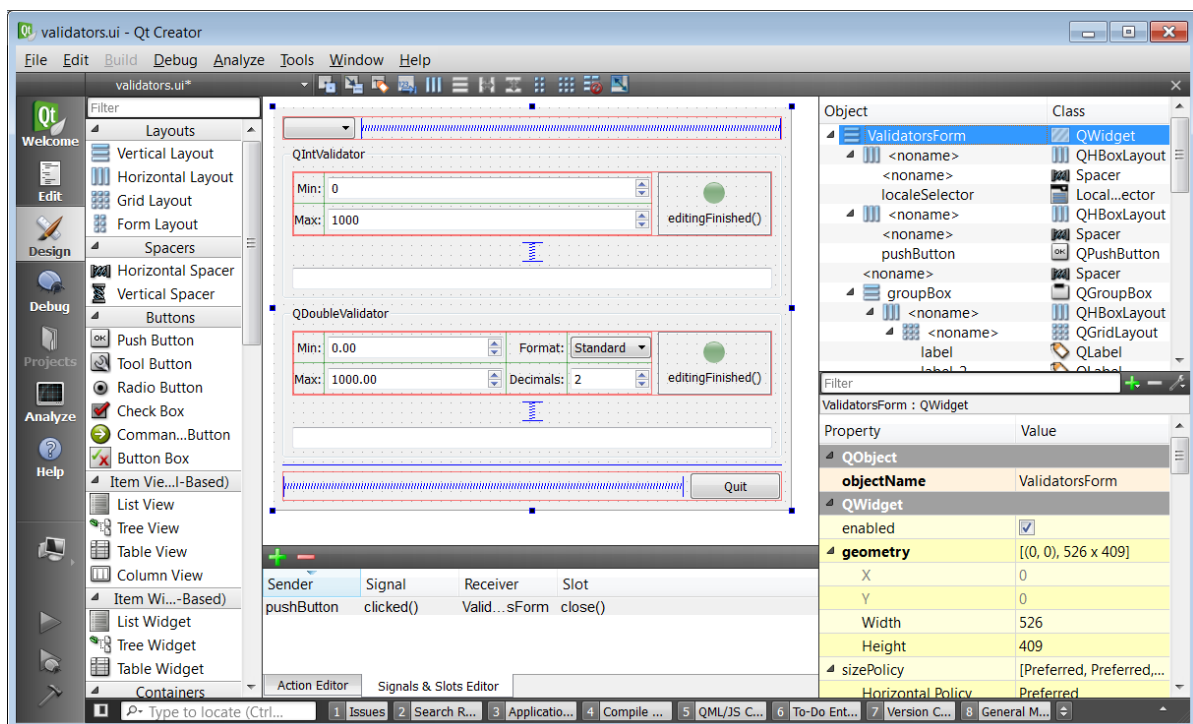


FIGURE 3.5 – Interface du framework Qt

4

CHAPITRE

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Contenu

1	Résultats relatifs à la revue de littérature	22
1.1	Corrélation entre les débits des différentes stations de la zone d'étude	22
1.2	Modèles simplifiés de prévision débit-débit	23
1.3	Niveau d'alerte de prévision	26
1.4	Performance hydrologique du système GloFAS	27
1.5	Performance en prévision des inondations du système GloFAS	29
2	Résultats relatifs à l'élaboration des programmes	30
3	Interface du système de prévision des inondations	31
3.1	Description des options de l'interface	31
3.2	Prévision avec l'interface	34
3.2.1	Prévision avec SAPI-Q	34
3.2.2	Prévision avec SAPI-G	34
4	Création de l'exécutable	35

1 Résultats relatifs à la revue de littérature

1.1 Corrélation entre les débits des différentes stations de la zone d'étude

Pour modéliser les débits d'une station à une date t (en jour), on utilise comme variables explicatives les données de débits d'une ou deux station(s) en amont qui l'alimente(nt) en tenant

compte du temps de propagation des crues. Au cas où les données de la station en amont ne sont pas disponibles, on explique le débit d'une date t par les débits des jours précédents. Les figures suivantes montrent les résultats des corrélations entre quelques stations hydrométriques.

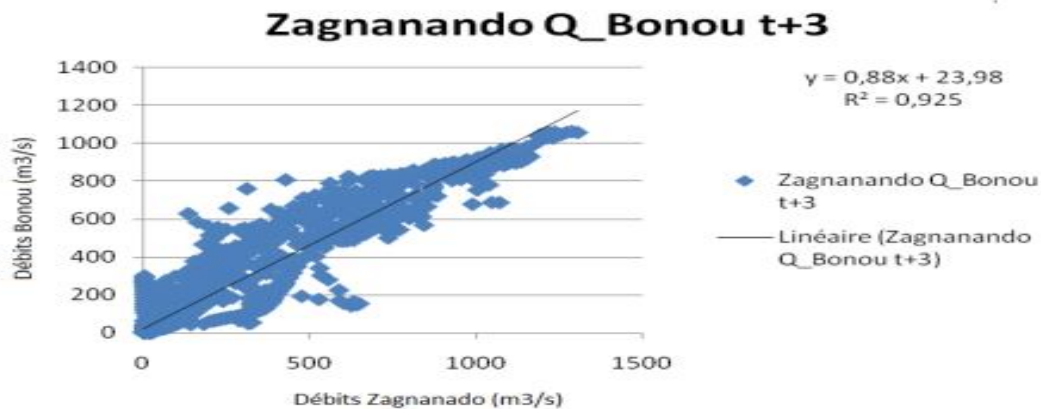


FIGURE 4.1 – Corrélation entre les débits de Zagnanando à t et de Bonou à $t+3$

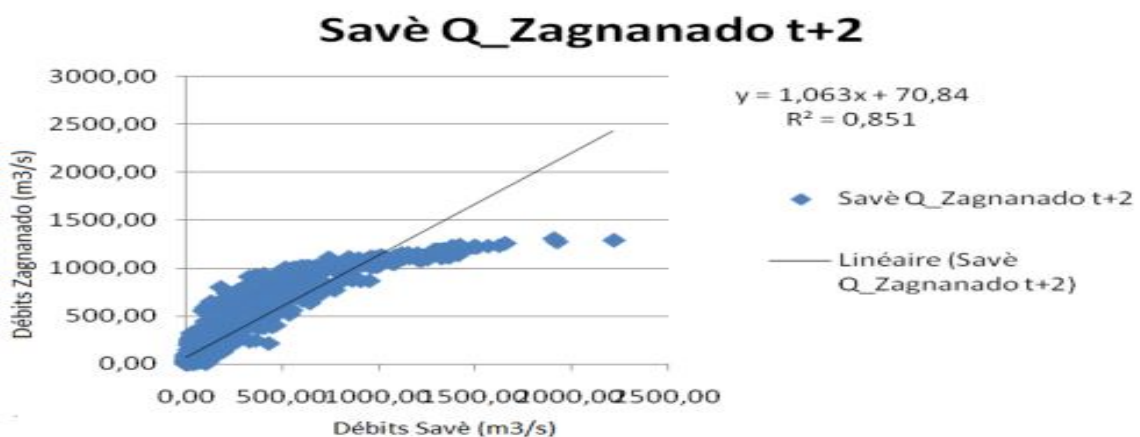


FIGURE 4.2 – Corrélation entre les débits de Savè à t et Zagnanando à $t+2$

les deux figures présentent des meilleurs coefficients de corrélation $R = 0,92$ et $R = 0,85$ respectivement qui sont associés à un p -value inférieur à 0,0001

1.2 Modèles simplifiés de prévision débit-débit

L'application des différentes méthodes a permis d'aboutir à la détermination, des modèles des prévisions, des courbes de tarage (débit à un instant t en fonction de la hauteur lue à l'échelle à cet instant, de l'inverse des courbes de tarage (hauteur à un instant t en fonction du débit à cet instant) grâce à des ajustements statistiques appropriés et la détermination des seuils et niveaux d'alerte relatifs aux inondations. Ces résultats station par station sont :

- Station : Mono à Athiémé

- Formule de prévision :

$$Q_{Athieme(t)} = 1,2425Q_{Athieme(t-1)} - 0,2553Q_{Athieme(t-2)} + 2,2215 \quad (4.1)$$

- Courbe de tarage :

$$Q_{Athieme} = 0,001H_{Athieme}^2 + 0,057H_{Athieme} - 19,10 \quad (4.2)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Athieme} = \frac{-0,057 + \sqrt{0,079649 + 0,004Q_{Athieme}}}{0,002} \quad (4.3)$$

- Station : Niger à Malanville

- Formule de prévision :

$$Q_{Malanville(t)} = 1,158Q_{Niamey(t-8)} + 63,39 \quad (4.4)$$

En absence du débit de Niamey, le modèle proposé est

$$Q_{Malanville(t)} = 1,7405Q_{Malanville(t-1)} - 0,7423Q_{Malanville(t-2)} + 1,3747 \quad (4.5)$$

- Courbe de tarage :

$$Q_{Malanville} = 0,005H_{Malanville}^2 - 2,534H_{Malanville} + 213,6 \quad (4.6)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Malanville} = \frac{2,534 + \sqrt{2,1492 + 0,02Q_{Malanville}}}{0,01} \quad (4.7)$$

- Station : Ouémé à Bétérou

- Modèle de prévision :

$$Q_{Beterou(t)} = 1,4647Q_{Beterou(t-1)} - 0,503Q_{Beterou(t-2)} + 8,5216 \quad (4.8)$$

- Courbe de tarage :

$$Q_{Beterou} = 0,0008H_{Beterou}^2 - 0,026H_{Beterou} + 5,664 \quad (4.9)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Beterou} = \frac{0,026 + \sqrt{0,0188 + 0,0032Q_{Beterou}}}{0,016} \quad (4.10)$$

- Station : Ouémé à Savè

- Modèle de prévision

$$Q_{Save(t)} = 1,6144Q_{Beterou(t-1)} + 2,9837Q_{Vossa(t-1)} + 26,1975 \quad (4.11)$$

En absence des débits de Bétérou ou de Vossa, nous avons les modèles suivants :

$$Q_{Save(t)} = 2,153Q_{Beterou(t-1)} + 29,45 \quad (4.12)$$

$$Q_{Save(t)} = 7,357Q_{Vossa(t-1)} + 48,13 \quad (4.13)$$

En absence des débits de Bétérou et de Vossa, nous avons le modèle suivants :

$$Q_{Save(t)} = 1,3206Q_{Save(t-1)} - 0,3427Q_{Save(t-2)} + 3,4777 \quad (4.14)$$

- Courbe de tarage

$$Q_{Save} = 0,001H_{Save}^2 - 0,149H_{Save} + 1,295 \quad (4.15)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Save} = \frac{0,149 + \sqrt{0,017021 + 0,004Q_{Save}}}{0,002} \quad (4.16)$$

- Station : Ouémé à Zagnanando

- Modèle de prévision

$$Q_{Zagnanando(t)} = 0,5631Q_{Save(t-2)} + 1,0903Q_{Kaboua(t)} + 174,8054 \quad (4.17)$$

En absence des débits de Savè ou de Kaboua, nous avons les modèles suivants :

$$Q_{Zagnanando(t)} = 4,166Q_{Save(t-2)}^{0,825} \quad (4.18)$$

$$Q_{Zagnanando(t)} = 2,740Q_{Kaboua(t)} + 112,4 \quad (4.19)$$

En absence des débits de Savè et de Kaboua, nous avons le modèle suivants :

$$Q_{Zagnanando(t)} = 1,6069Q_{Zagnanando(t-1)} - 0,6150Q_{Zagnanando(t-2)} + 2,0570 \quad (4.20)$$

- Courbe de tarage

$$Q_{Zagnanando} = 0,001H_{Zagnanando}^2 - 0,481H_{Zagnanando} + 44,98 \quad (4.21)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Zagnanando} = \frac{0,481 + \sqrt{0,051441 + 0,004Q_{Zagnanando}}}{0,002} \quad (4.22)$$

- Station : Ouémé à Bonou

- Modèle de prévision

$$Q_{Bonou(t)} = 2,5884Q_{Dome(t-4)} + 0,5603Q_{Zagnanando(t-3)} + 48,2425 \quad (4.23)$$

En absence des débits de Domè ou de Zagnanando, nous avons les modèles suivants :

$$Q_{Bonou(t)} = 6,557Q_{Dome(t-4)} + 9,211 \quad (4.24)$$

$$Q_{Bonou(t)} = 0,88Q_{Zagnanando(t-3)} + 23,98 \quad (4.25)$$

En absence des débits de Domè et de Zagnanando, nous avons le modèle suivants :

$$Q_{Bonou(t)} = 1,7102Q_{Bonou(t-1)} - 0,7124Q_{Bonou(t)} + 0,4283 \quad (4.26)$$

- Courbe de tarage

$$Q_{Bonou} = 0,001H_{Bonou}^2 - 0,186H_{Bonou} + 11,42 \quad (4.27)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Bonou} = \frac{0,186 + \sqrt{-0,011084 + 0,004Q_{Bonou}}}{0,002} \quad (4.28)$$

- Station : Okpara à Kaboua

- Formule de prévision :

$$Q_{Kaboua(t)} = 0,4804Q_{Kaboua(t-1)} + 0,4233Q_{Kaboua(t-2)} + 7,1106 \quad (4.29)$$

- Courbe de tarage :

$$Q_{Kaboua} = 0,001H_{Kaboua}^2 - 0,128H_{Kaboua} + 1,715 \quad (4.30)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Kaboua} = \frac{0,128 + \sqrt{0,009524 + 0,004Q_{Kaboua}}}{0,002} \quad (4.31)$$

- Station : Zou à Atchérigbé

- Formule de prévision :

$$Q_{Atcherigbe(t)} = 0,9546Q_{Atcherigbe(t-1)} - 0,2745Q_{Atcherigbe(t-2)} + 51,192 \quad (4.32)$$

- Courbe de tarage :

$$Q_{Atcherigbe} = 0,0005H_{Atcherigbe}^2 + 0,071H_{Atcherigbe} - 7,181 \quad (4.33)$$

- Inverse de la courbe de tarage :

$$H_{Atcherigbe} = \frac{-0,071 + \sqrt{0,019403 + 0,002Q_{Atcherigbe}}}{0,001} \quad (4.34)$$

1.3 Niveau d'alerte de prévision

Les différents niveaux d'alerte établis par (ALAMOU et al., 2014) sont résumés dans le tableau ci-après :

Niveau d'alerte (cm)	Bétérou	Savè	Zagnanando	Bonou	Malanville	Athiémé
Verte	0 - 575	0- 600	0 - 625	0 - 550	0 - 675	0 - 575
Jaune	575 -725	600-775	625-750	550 - 700	675-775	575-700
Orange	725-800	775-900	750 -850	700 - 800	775 - 850	700- 800
Rouge	800 et +	900 et +	850 et +	800 et +	850 et +	800 et +

1.4 Performance hydrologique du système GloFAS

La Figure 4.2 présente les performances en simulation des débits du système GloFAS obtenues par (HOUNKPE et BOSSA, 2023) avec les critères ordinairement utilisés en modélisation hydrologique tels que le KGE, le NSE, le APB et le RSR. La station dont les débits sont le mieux reproduits par le système GloFAS est celle de Bonou dont le KGE et NSE sont supérieurs à 0,5; le RSR inférieur à 0.75 ainsi que le APB inférieur a 25% pour des temps de prévision allant de 1 à 8 jours. Au-delà de 8 jours, la performance du système dégrade à la station de Bonou à l'exception du critère de APB qui indique une amélioration des simulations au-delà des temps de prévision de 8 jours. Après la station de Bonou, vient celle de Ahlan dont les valeurs de KGE et NSE (respectivement APB) sont proche de 0.5 (respectivement de 25%) avec un RSR inférieur à 0.75 pour des temps de prévision allant de 1 à 8 jours. Aucune des stations n'a obtenu une valeur de KGE inferieur à zéro. Or selon (GUPTA et al., 2009), les valeurs de KGE supérieures à -0,41 indiquent que le système améliore le débit moyen de référence, même si la valeur KGE du modèle est négative. Ainsi donc, on peut conclure que le système GloFAS améliore la simulation des débits pour toutes les stations considérées et tous les temps de prévision considérés. On peut aussi noter ici que les performances en simulation des débits du système augmentent avec les superficies des bassins versants considérés.

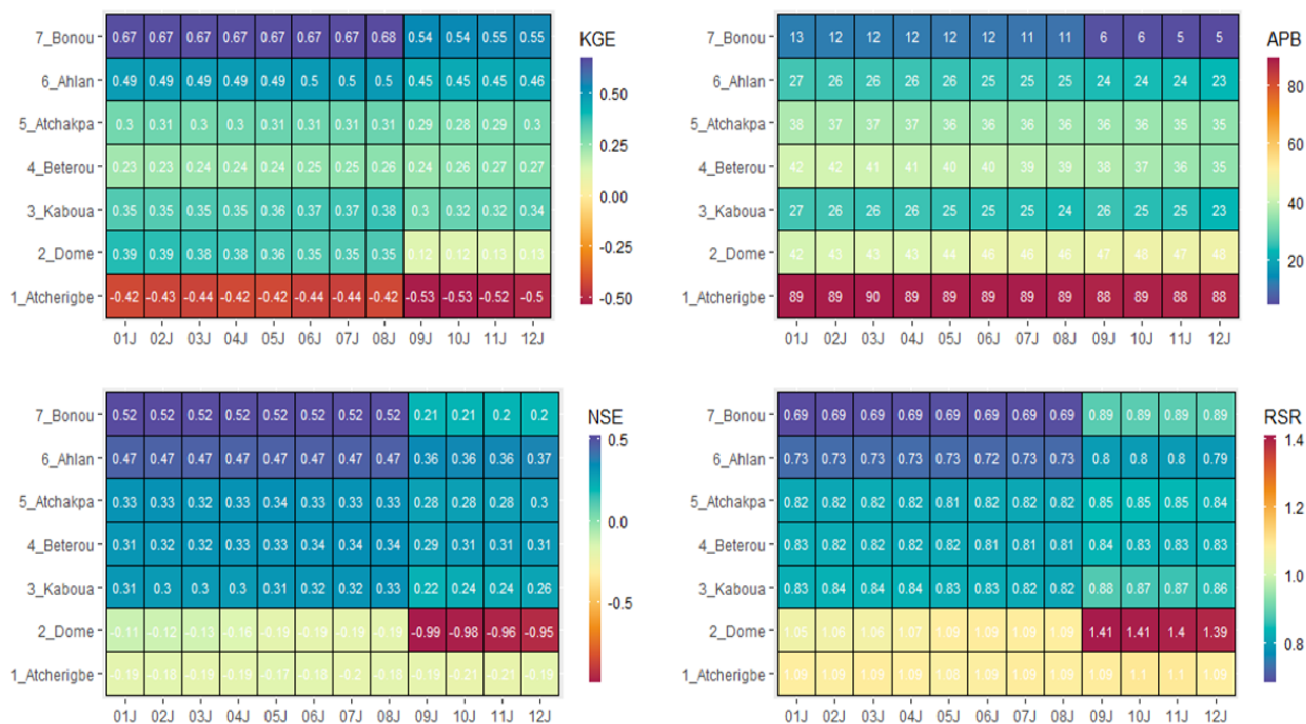


FIGURE 4.3 – Performances en simulation des débits du système GloFAS en utilisant le KGE, NSE, RSR

Les Figure 4.3 et 4.4 montrent les courbes des débits observés et des prévisions brutes (passées) sur 1 à 12 jours pour les stations de Bonou et Ahlan où le système a montré de meilleur performance de 2000 à 2018. Pour les deux stations, le modèle reproduit assez bien les observations avec toutefois des sous-estimations par endroit. Pour la station de Bonou, la similitude entre les deux courbes est très bonne avec une légère sous-estimation des débits quelques soit le temps de prévision considéré.

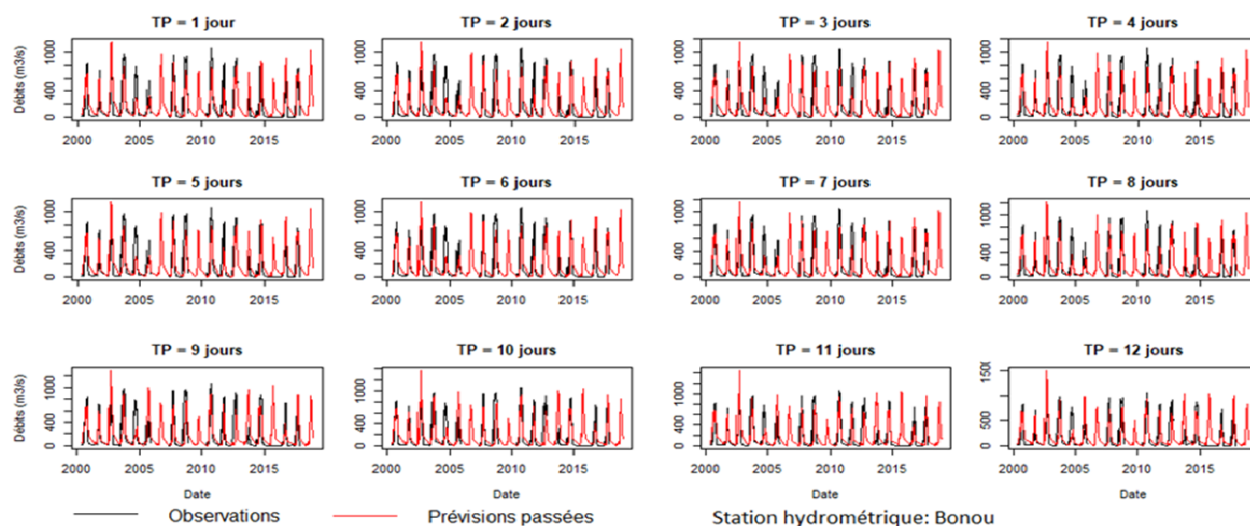


FIGURE 4.4 – : Courbes des débits observés et des prévisions brutes passées de GloFAS de 2000 à 2018 sur les temps de prévision (TP) de 1 à 12 jours pour station de Bonou

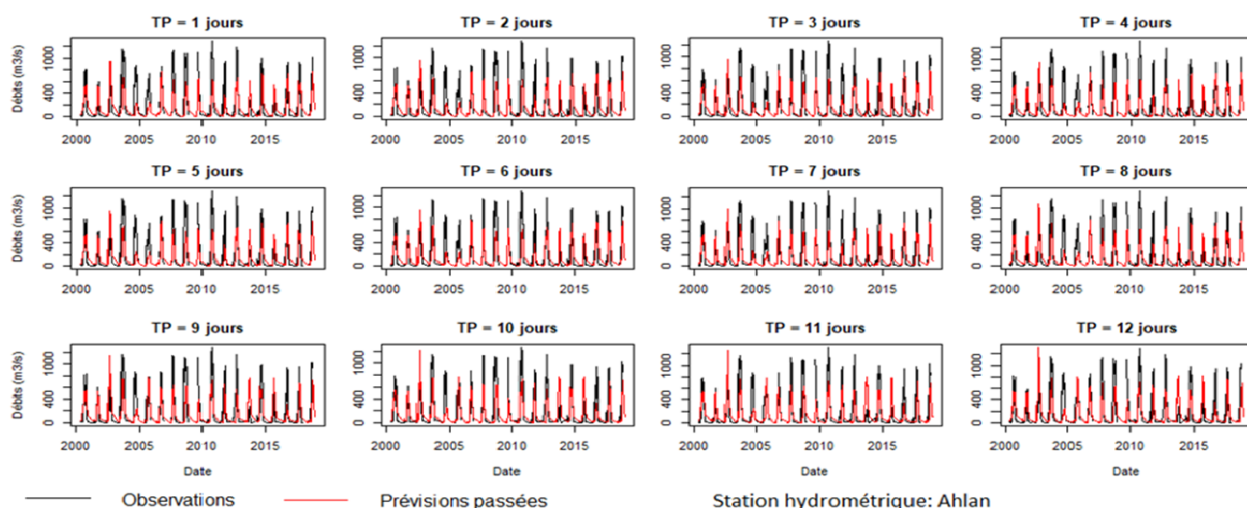


FIGURE 4.5 – : Courbes des débits observés et des prévisions brutes passées de GloFAS de 2000 à 2018 sur les temps de prévision (TP) de 1 à 12 jours pour station de Ahlan

1.5 Performance en prévision des inondations du système GloFAS

La Figure 4.4 suivante présente les performances prévisionnelles des inondations du système GloFAS obtenues par (HOUNKPE et BOSSA, 2023) pour différents temps de prévision (1 à 12 jours). Il s'agit des critères de prévision tels que la probabilité de détection (POD) ou taux de succès, le rapport de fausses alertes (FAR), du ratio de vraisemblance (RV) et le score de ROC qui évaluent le degré de correspondance entre les prévisions et les observations. Comme indiqué dans la méthodologie, le POD et FAR doivent être interprétés conjointement. Les bonnes prévisions doivent exhiber de fortes valeurs de POD et de faibles valeurs de FAR. La station de Domè indique les plus grandes valeurs de POD et de FAR, ce qui indique que les bons taux des prévisions se dégradent par les taux élevés de fausses alertes. Ce qui implique du coup que ces prévisions pour la station de Domè ne sont pas vraiment exploitables. Le RV et le ROC qui sont des critères de précision fonction du POD et du FAR seront donc priorisés dans l'interprétation des performances prévisionnelles. Le RV étant le rapport entre POD et FAR, nous faisons l'assertion qu'une prévision est acceptable si RV est supérieur ou égale à 6, c'est-à-dire le taux de succès est au moins six fois supérieur au taux de fausses alertes. Cette condition est satisfaite pour les stations de Bétérou, Atchakpa, Ahlan et Bonou pour presque tous les temps de prévision considérés l'exception des temps de prévision de 9 à 12 jours pour la station de Bonou (Figure 4.4). La plus grande valeur de RV a été obtenue pour la station de Bétérou et le temps de prévision de 3 jours. Les prévisions à la station d'Atchérigbé sont les plus mauvaises avec des RV pratiquement nulles. Pour les stations de Domè et Kaboua, la valeur ajoutée des prévisions n'est pas assez claire selon le RV. Le ROC semble ne pas être un critère de différenciation assez pertinent. Par exemple, des RVs de 3 et 8 correspondent environ à des ROC de 41 et 45 respectivement pour Domè et Bonou donnant l'impression de performances similaires pour les deux stations. Ce critère de ROC ne sera pas utilisé dans la suite de ce document.

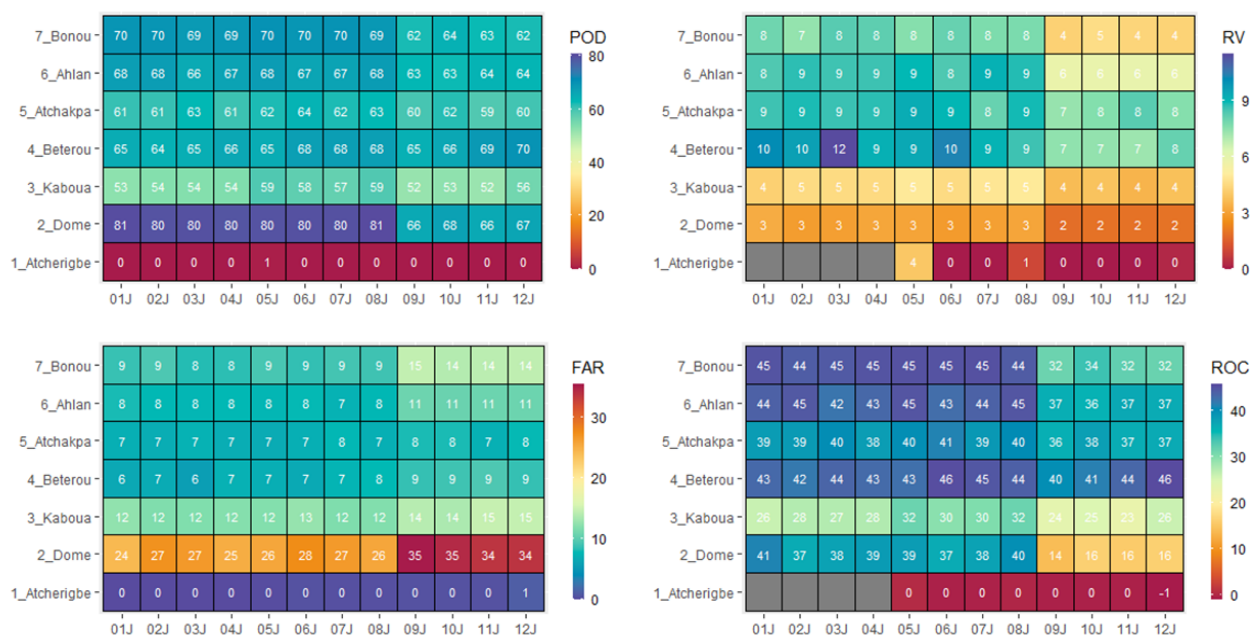


FIGURE 4.6 – : Qualité prévisionnelle des inondations du système GloFAS pour différents temps de prévision (1 à 12 jours)

2 Résultats relatifs à l'élaboration des programmes

Pour élaborer les programmes relatifs à la prévision selon chaque système, plusieurs fonctions ont été créées :

Dans un premier temps, l'utilisateur spécifie les paramètres de la prévision (Date de prévision, la station, le système de prévision, et les coefficients nécessaires) qui passe par une fonction appelée **Confirmation** pour vérifier si tous les paramètres sont présents, sinon il signale à l'utilisateur de choisir tous les paramètres. Une fois les paramètres sont au complets, ils passent dans la fonction appelée **Prevision** qui lui-même fait appel a une bibliothèque de fonction afin de lui renvoyer la fonction de prévision qui correspond au système de prévision choisir. La figure suivante présente le fonctionnement global des fonctions. Les deux figures suivantes

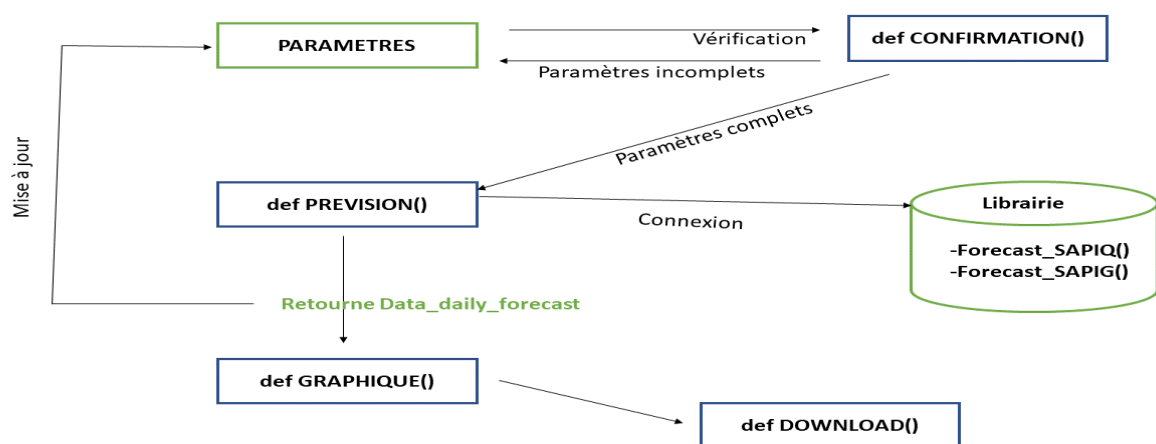


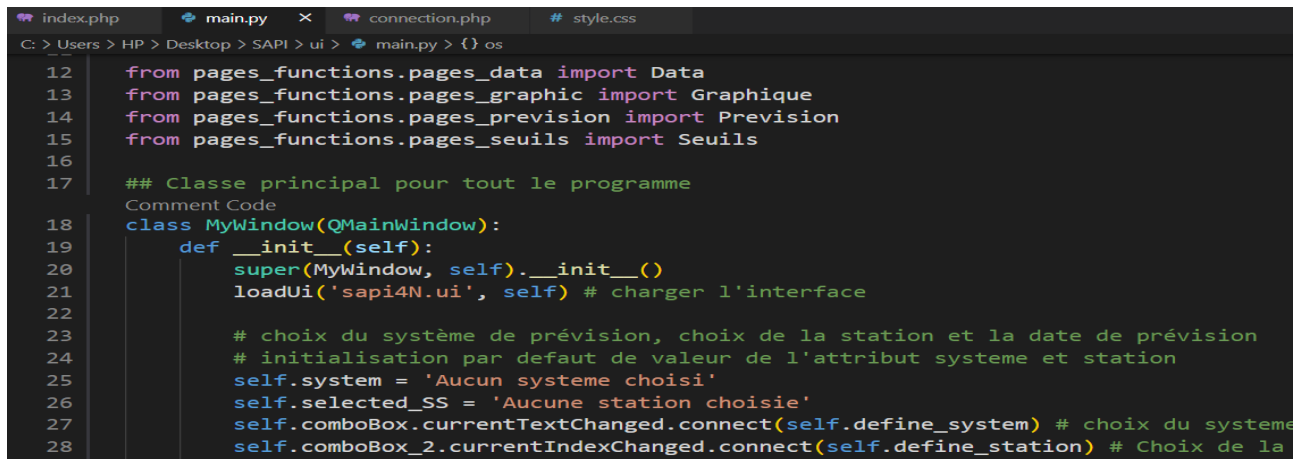
FIGURE 4.7 – Fonctionnement de l'interface

présentent quelques fonctions internes de notre librairie.

```

16 # Ouvrir le fichier NetCDF en mode lecture
17 # ici fichier = File
18 A = nc.Dataset(fichier, 'r')
19 + # Extraire les données de latitude et longitude
20 latitude = A.variables['latitude'][:] # latitudes disponibles dans la s
21 longitude = A.variables['longitude'][:] # longitudes disponibles dans la
22 ## Determiner les coordonnées à utiliser pour station
23 def geo_idx(dd, dd_array):
24     """
25     dd: longitude ou latitude de la station
26     dd_array : serie des longitudes ou latitudes de la serie du fichier
27     """
28     geo_idx = (np.abs(dd_array - dd)).argmin()
29     return geo_idx
30
31 LongUsed = geo_idx(Longitudee, longitude)
32 LatUsed = geo_idx(Latitudee, latitude)
33
34 Outt=A.variables['dis24'][:, :, LatUsed, LongUsed] # extraction des debits
35 ZZ=np.asmatrix(Outt).transpose()
  
```

FIGURE 4.8 – Code d'extraction des débits sur le fichier NetCDF



```

12 from pages_functions.pages_data import Data
13 from pages_functions.pages_graphic import Graphique
14 from pages_functions.pages_previson import Previson
15 from pages_functions.pages_seuils import Seuils
16
17 ## Classe principal pour tout le programme
18 class MyWindow(QMainWindow):
19     def __init__(self):
20         super(MyWindow, self).__init__()
21         loadUi('sapi4N.ui', self) # charger l'interface
22
23         # choix du système de prévision, choix de la station et la date de prévision
24         # initialisation par défaut de valeur de l'attribut systeme et station
25         self.system = 'Aucun systeme choisi'
26         self.selected_SS = 'Aucune station choisie'
27         self.comboBox.currentTextChanged.connect(self.define_system) # choix du systeme
28         self.comboBox_2.currentIndexChanged.connect(self.define_station) # Choix de la

```

FIGURE 4.9 – Création d’une classe contenant tout le programme de l’interface

3 Interface du système de prévision des inondations

Etant donné les bonnes performances de l’optimisation du système GloFAS basée sur la mise à jour des prévisions et la bonne relation des débits entre les différentes stations, il a été développé une interface du système de prévision des inondations basée sur deux systèmes de prévisions à savoir :

- Le système SAPI-Q : basé sur le modèle de prévision débit-débit, c’est-à-dire utilise les débits d’une ou des station(s) en amont pour prédire les débits de la station en aval . Ceci est possible grâce à la relation de corrélation entre les stations
- Le système SAPI-G : basé sur la prévision GloFAS ; après avoir téléchargé les prévisions pour les douze prochains jours suivant la station choisie par l’utilisateur, corrige automatiquement ces prévisions si les observations du jour précédant sont fournies. Le système trace les prévisions brutes avec celles corrigées ainsi que les seuils correspondants aux divers niveaux d’alerte Jaune, Orange et Rouge. Le système fournit également les seuils d’alerte, le tableau des prévisions (date, maximum des prévisions, 3 et 1^{er} quartiles, la moyenne et la moyenne corrigée) ; les observations du jour actuel ou du jour précédant fournies par l’utilisateur.

La figure suivante présente l’interface réalisée dans le cadre de cette étude.

3.1 Description des options de l’interface

Le tableau suivant présente les différentes options de l’interface et le rôle de chaque option. Les captures d’écran correspondant à chaque option sont présentés.

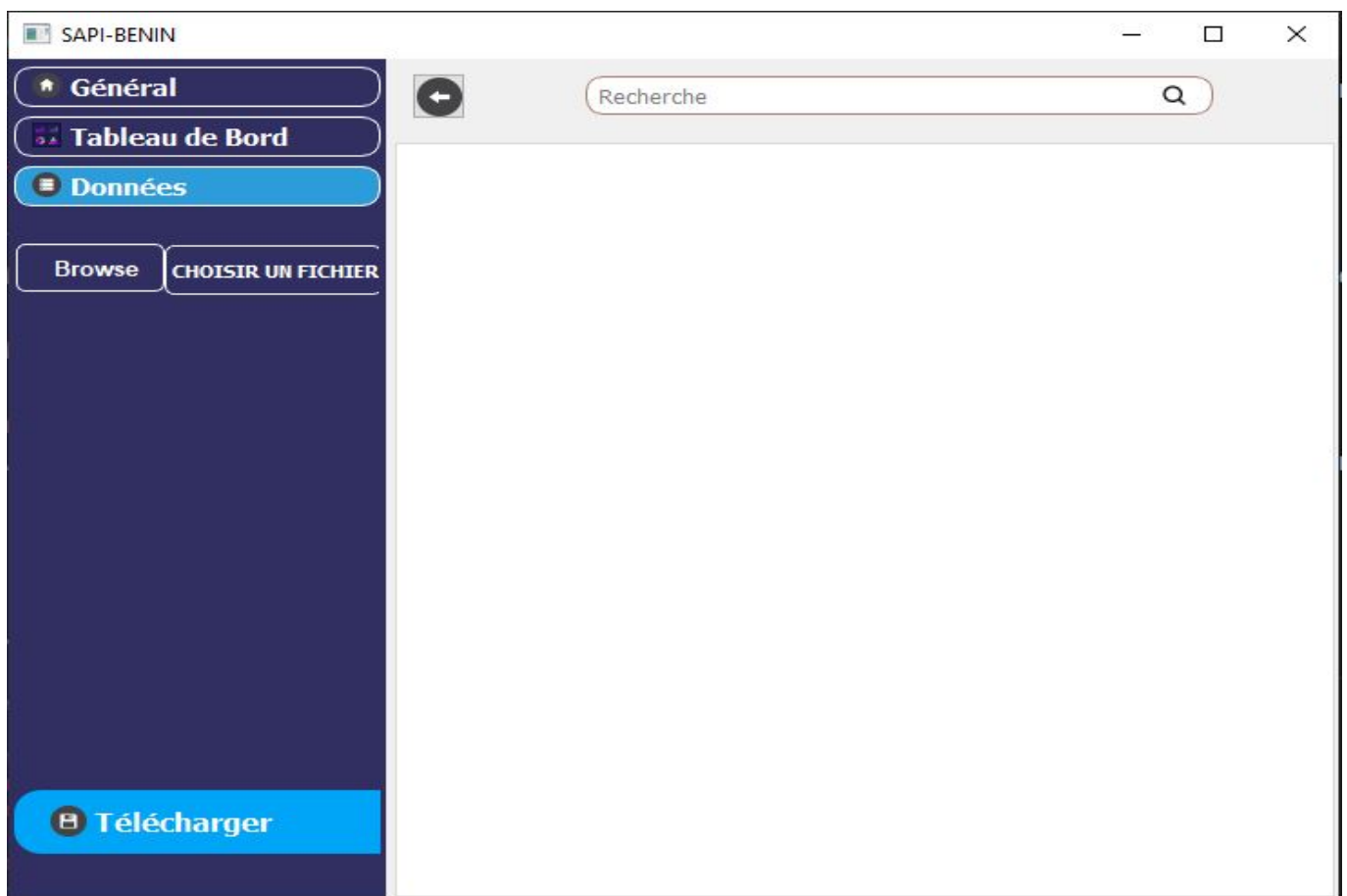
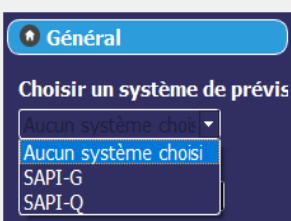
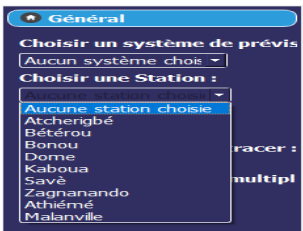
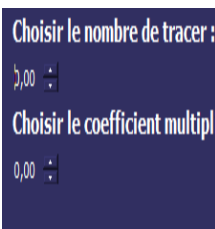
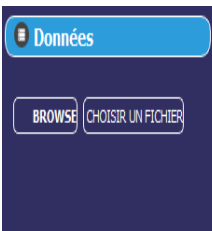


FIGURE 4.10 – Interface du système de prévision des inondations

TABLE 4.1 – Description des options du système

Options	Descriptions
Option 1	Deux systèmes de prévision sont disponibles pour l'utilisateur. Il s'agit des systèmes d'alerte précoce aux inondations basés sur la relation débit-débit (SAPI-Q) et sur l'optimisation des sorties de GloFAS (SAPI-G). 
Option 2	Ce menu déroulant permet de choisir la station pour laquelle la prévision sera faite. Il a été considéré au total neuf stations réparties sur trois bassins hydrographiques notamment le bassin de l'Ouémé (Bétérou, Savè, Kaboua, Zagnanando, Atchérigbé, Domè, Bonou), du Mono (Athiémé) et du Niger au Bénin (Malanville). 
Option 3	Cette option est dans menu général et donne la possibilité à l'utilisateur de choisir la date de prévision. Il peut aussi faire des post-visions (hindcast en anglais) en choisissant des dates antérieures. 
Option 4	Cette option est dans menu général permet de faire varier le nombre de données d'observation à tracer sur le graphique donnant les prévision et d'augmenter la limite supérieure du seuil d'alerte rouge en cas de besoin. 
Option 5	Cette option est dans le menu données et permet de choisir le fichier de données des hauteurs d'eau des stations. Ce fichier doit être un fichier.txt 
Option 6	Le tableau de bord, est ce menu qui permet de visualiser le graphique de prévision, les données de prévisions, le seuil d'alerte et les données préalablement chargées dans le système à travers le bouton browse 
Option 7	Cette option permet de télécharger le graphique de prévision . 

3.2 Prédiction avec l'interface

3.2.1 Prédiction avec SAPI-Q

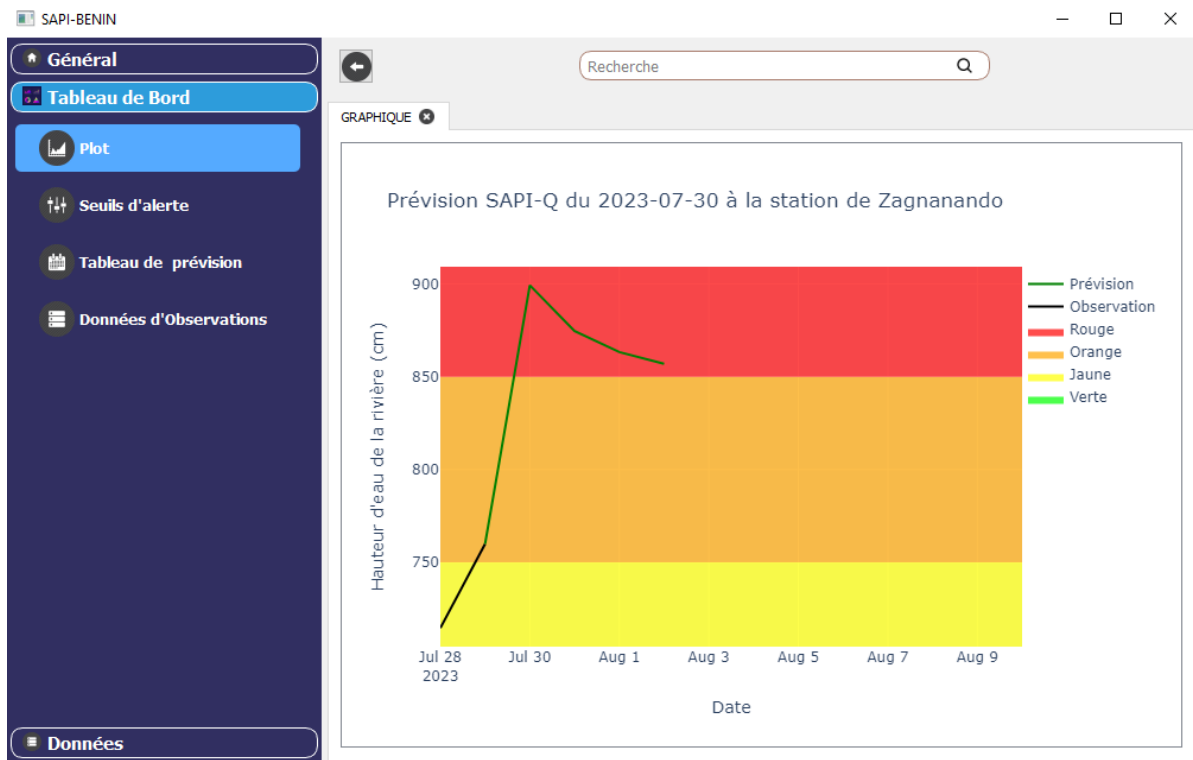


FIGURE 4.11 – Prédiction avec SAPI-Q à la station de Bonou avec l'interface autonome

3.2.2 Prédiction avec SAPI-G

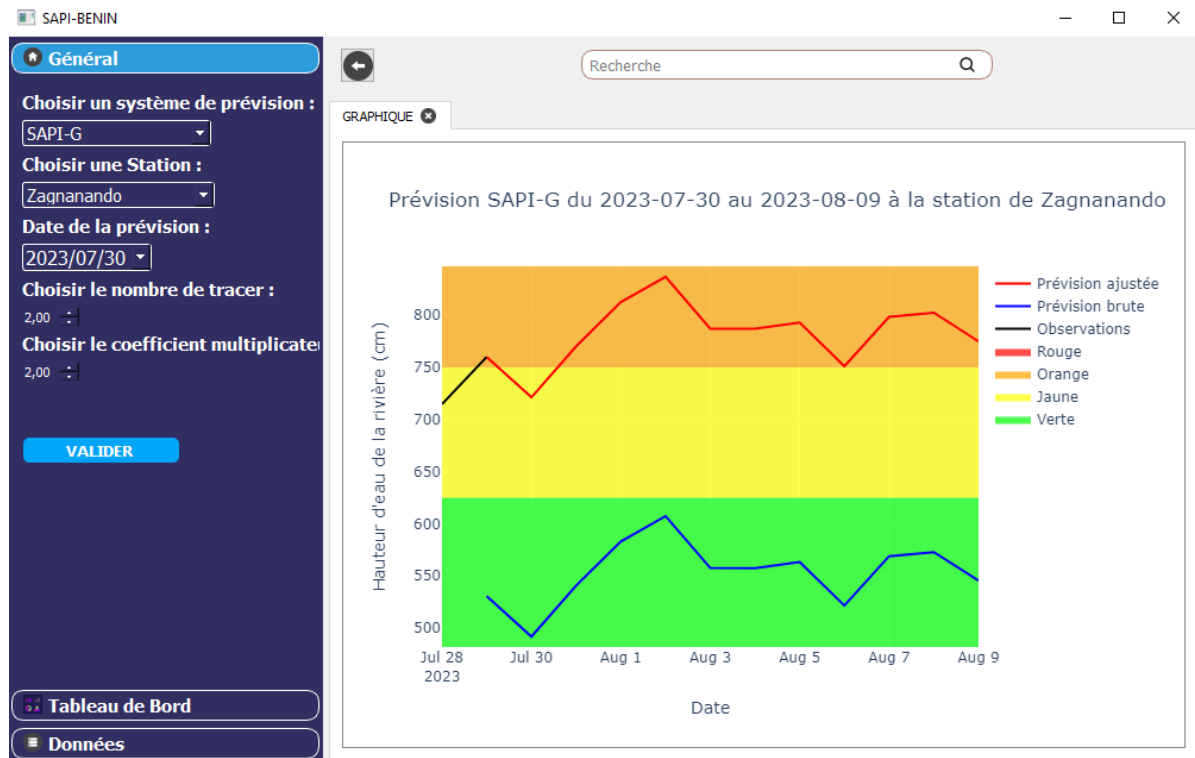


FIGURE 4.12 – Simulation avec SAPI-G à la station de Bonou

4 Création de l'exécutable

Un fichier exécutable est un fichier informatique contenant un programme en code binaire pouvant être directement exécuté par le système d'exploitation installé sur un ordinateur. Notre interface contient plusieurs de programmes, il est donc nécessaire de mettre tout les programmes en un seul fichier exécutable pour satisfaire l'objectif de notre travail.

Dans python, nous avons utilisé la bibliothèque **auto-py-to-exe** pour créer l'exécutable. Cette bibliothèque possède des options qui nous permettent de donner un nom à l'application, une icône et aussi fournit une licence si cela est nécessaire. Le nom donné à cette application **SAPI**

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'intérêt de ce travail est de développer une interface graphique pour la prévision des inondations dans le bassin de l'Ouémé. Cette interface a été développée avec l'outil informatique Qt Designer qui est la partie graphique du framework Qt. Deux systèmes de prévision ont été implémentés dans l'interface à l'aide du langage informatique python pour faire la prévision des inondations. Il s'agit du système SAPI-Q basé sur la relation récurrente des débits entre les stations hydrométriques et le système SAPI-G basé sur les prévisions de GloFAS. L'utilisation de cette interface est résumée juste à des cliques sur les boutons pour faire des actions spécifiques et enfin télécharger le graphique qui sort de cette prévision pour être utilisé à des fins d'aide à la décision pour la lutte contre les inondations.

Aucun travail humain n'étant parfait, ce travail souffre sans doute des insuffisances auxquels il est nécessaire de continuer à travailler. Nous envisageons de rendre encore plus dynamique cette interface en complétant des modèles pluie-débits et pourquoi pas un modèle de l'intelligence artificielle pour la gestion des catastrophes liées aux inondations et qui donneraient des meilleurs résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAM, KS et M BOKO (1993). « Le Bénin, EDICEF ». In : *Les Éditions du Flamboyant. Paris, France*.
- ALAMOU, ERIC et al. (2014). « Rapport définitif conception de modèles simplifiés de prévision et la détermination des seuils et niveaux d'alerte relatifs aux inondations au Bénin ». In.
- ALFIERI, Lorenzo et al. (2013). « GloFAS–global ensemble streamflow forecasting and flood early warning ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 17.3, p. 1161-1175.
- BALSAMO, Gianpaolo et al. (2009). « A revised hydrology for the ECMWF model : Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System ». In : *Journal of hydrometeorology* 10.3, p. 623-643.
- BATES, Paul et al. (2005). « LISFLOOD-FP User manual and technical note ». In : *University of Bristol, UK*.
- BIAO, Eliézer et al. (2016). « Improving rainfall–runoff modelling through the control of uncertainties under increasing climate variability in the Ouémé River basin (Benin, West Africa) ». In : *Hydrological Sciences Journal* 61, p. 2902-2915.
- BIAO, Eliézer Iboukoun (2017). « Assessing the impacts of climate change on river discharge dynamics in Oueme River Basin (Benin, West Africa) ». In : *Hydrology* 4.4, p. 47.
- BOKO, M et LC ADJOVI (2018). « Recherche de tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional : Implications agroclimatiques ». In : *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 7, p. 294-304.
- DESCROIX, Luc et al. (2018). « Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanian strip : An updated review ». In : *Water* 10.6, p. 748.
- DONOU, BT (2015). « Extrêmes hydroclimatiques dans le bassin inférieur du fleuve Ouémé : Diagnostic, impact agricole et scénario de gestion ». Thèse de doct. EDP/FLASH/UAC Abomey-Calavi, Bénin.
- GABA, Charlene et al. (2015). « An ensemble approach modelling to assess water resources in the Mékrou Basin, Benin ». In.
- GUPTA, Hoshin V et al. (2009). « Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling ». In : *Journal of hydrology* 377.1-2, p. 80-91.
- HOUNKPE, Jean et AYMAR BOSSA (2023). « Optimisation des systèmes de prévisions basés sur GloFAS et FANFAR ». In.
- MAMADOU, Ibrahim et al. (2015). « Exorheism growth as an explanation of increasing flooding in the Sahel ». In : *Catena* 131, p. 130-139.
- NASH J Eamonn et Sutcliffe, Jonh V (1970). « Prévision du débit des rivières à travers des modèles conceptuels, partie I – Discussion des principes ». In : *Journal d'hydrologie* 10.3, p. 282-290.

- NNOMO, Bernadette Nka (2016). « Contribution à l'Actualisation des Normes Hydrologiques en relation avec les Changements Climatiques et Environnementaux en Afrique de l'Ouest ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- RENET, Sandrine (2014). « Compter et raconter les catastrophes ». In : *Communications* 3, p. 81-92.
- SIGHOMNOU, Daniel et al. (2013). « La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel ? » In : *Science et changements planétaires/Sécheresse* 24.1, p. 3-13.
- VISSIN, Expédit (2007). « Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger ». Thèse de doct. Université de Bourgogne.
- ZANNOU, Arnaud (2014). « Analyse du cycle hydrologique en climat soudanien au Bénin ». Theses.