



REPUBLIQUE DU BENIN

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

CENTRE D'EXCELLENCE D'AFRIQUE POUR L'EAU ET L'ASSAINISSEMENT (C2EA)

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU (HGRE)

Mémoire Master

Option : Hydro-Informatique

**DEVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION MOBILE POUR LA SURVEILLANCE
DU CHLORE RESIDUEL DANS UN RESEAU D'AEP : CAS DU RESEAU DE
DISTRIBUTION D'EAU POTABLE DU VILLAGE D'ALINKA AU TOGO.**

Réalisé et présenté par :

N'Yaba-N'ssilè TCHA THOM

Superviseur

Prof. Agnidé Emmanuel LAWIN
Enseignant-chercheur à l'INE/UAC
Professeur Titulaire du CAMES

Co-superviseur

Dr Audace Amen V. DOSSOU-OLORY
Maître-Assistant du CAMES

Jury composé de :

Président : Prof Nicaise YALO

Rapporteur : Dr Audace Amen V. DOSSOU-OLORY

Examineur : 1 Dr Yèkambèssoun N'TCHA M'PO

Examineur : 2 Dr Jean HOUNKPE

Année académique : 2023-2024

DEDICACE

À Jésus-Christ, Mon Seigneur « lui par qui j'ai été sauvé, fortifié et par qui j'ai pu tout faire »

N'Yaba-N'ssilè TCHA THOM

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien, tant moral que spirituel, durant mon parcours universitaire jusqu'à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent particulièrement :

- ❖ A Dieu de m'avoir accordé le courage et la persévérance de pouvoir mener à bon terme ce travail ;
- ❖ Au Professeur Agnidé Emmanuel LAWIN mon superviseur pour sa direction éclairée et son soutien durant la réalisation de ce mémoire ;
- ❖ Au Dr Audace A. V. DOSSOU-OLORY mon encadreur, pour son orientation, son suivi rigoureux, ses conseils, son expertise technique et son engagement indéfectible dans l'encadrement de ce mémoire ;
- ❖ Au Centre d'Excellence d'Afrique pour l'Eau et l'Assainissement (C2EA), à l'Institut National de l'Eau (INE) pour leurs efforts, leur soutien tant financier moral, ainsi que pour la qualité de leur enseignement, qui ont grandement contribué à la réussite de cette formation ;
- ❖ Au chef de service Contrôle Technique de la Société SP-EAU monsieur AREDJOUME Pakidame et au technicien de la TDE pour tous leurs efforts fournis afin d'obtenir les données nécessaires pour la rédaction de ce mémoire ;
- ❖ A ma très chère famille qui m'a toujours soutenue ;
- ❖ A messieurs AGNICHOLA Urbain, TOKPLONOU Darell et EBRI Kokouvi Michel et à mes collègues qui ont partagé leur soutien durant la réalisation de ce mémoire ;
- ❖ A tous mes frères et sœurs togolais à l'Institut National de l'Eau ;
- ❖ A tous mes camarades d'Hydro-Informatique ;
- ❖ A toute personne qui, de près ou de loin a contribué à la réalisation de ce travail.

RESUME

La surveillance de la qualité de l'eau potable est un enjeu crucial pour garantir la santé publique. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de développer une application mobile pour la surveillance en temps réel de la concentration du désinfectant résiduel aux différents nœuds du réseau d'approvisionnement du village d'Alinka. Pour ce faire, le plan du réseau avec ses différentes composantes et de production ont été utilisés. La méthode proposée est basée dans un premier temps sur la simulation du réseau d'AEP du village à partir du logiciel EPANET 2.0 afin de déterminer le taux de chlore (0,49 mg/l) qui est dans les normes fixées, ainsi que le débit qui transite sur chaque tronçon et la pression aux différents nœuds. Dans un deuxième temps, un site web a été créé afin d'enregistrer le fichier.inp d'EPANET qui a été exploité dans l'application mobile développée avec FLUTTER pour l'interface utilisateur, Python avec la bibliothèque WNTR pour la lecture du fichier.inp, SQLAlchemy et SQLite pour la gestion des données. Un protocole d'alerte en cas d'anomalies a également été élaboré afin d'automatiser le système dans l'avenir. Ce projet s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la gestion du réseau de distribution d'Alinka, en fournissant aux exploitants un outil efficace pour surveiller et garantir une eau de qualité. L'application pourra être améliorée à l'avenir en intégrant des alertes en cas d'anomalies et d'autres indicateurs de qualité de l'eau.

Mots clés : Réseau de distribution d'eau, Application mobile, EPANET, Village d'Alinka, Qualité de l'eau.

ABSTRACT

Monitoring the quality of drinking water is crucial to ensuring public health. In this context, the aim of this study is to develop a mobile application for real-time monitoring of residual disinfectant concentration at the various nodes of the Alinka village water supply network. To achieve this, the network plan with its various components and production were used. The proposed method is based initially on simulation of the village's water supply network using EPANET 2.0 software, in order to determine the chlorine level (0.49 mg/l), which is within the set standards, as well as the flow rate through each section and the pressure at the various nodes. Secondly, a website was created to store the EPANET.inp file, which was used in the mobile application developed with FLUTTER for the user interface, Python with the WNTR library for reading the .inp file, SQLAlchemy and SQLite for data management. An anomaly alert protocol has also been drawn up to automate the system in the future. This project is part of a drive to improve management of Alinka's distribution network, by providing operators with an effective tool for monitoring and guaranteeing water quality. The application can be enhanced in the future by integrating anomaly alerts and other water quality indicators.

Key words: Water distribution network, Mobile application, EPANET, Village of Alinka, Water quality.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Directive de qualité des paramètres physico-chimiques de l'eau de boisson (FAO, 2015).....	23
Tableau 2 : Quelques exemples de réactions (Rossman, 2000)	25
Tableau 3: Caractéristiques du réservoir	32
Tableau 4: Caractéristiques du réseau tracé avec des logiciels	33
Tableau 5: Calcul de la population actuelle et à l'horizon 2050	45
Tableau 6: Calcul de la consommation journalière moyenne	45
Tableau 7: Consommation jour de pointe	45
Tableau 8: Caractéristiques du réservoir	45
Tableau 9: Données simulées au niveau des nœuds.....	50
Tableau 10: Données simulées au fil du temps	52
Tableau 11: Exemple de variation de la concentration de chlore au fil du temps à un seul nœud.....	52

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les équipements du réseau : A : vanne, B : ventouse, C : vidange, D : regard, E : stabilisateur de pression, F: poteaux d'incendies	15
Figure 2 : Éléments d'un système d'AEP (Blindu, 2004).....	16
Figure 3 : Les eaux de surface (Lac)	17
Figure 4 : Captage des eaux souterraines	18
Figure 5 : Illustration du réseau maillé.....	19
Figure 6 : Illustration du réseau ramifié	20
Figure 7: Carte de localisation du Village d'Alinka	30
Figure 8: Présentation de l'interface d' EPANET 2.0	36
Figure 9: Système de distribution d'eau sur EPANET	36
Figure 10: Quelques exemples de courbes caractéristiques	37
Figure 11 : Tracé du réseau sur EPANET	42
Figure 12 : Paramétrage des options	43
Figure 13 : Paramétrage de la qualité.....	43
Figure 14 : Paramétrage des réactions.....	43
Figure 15 : Exemple de saisie de données pour les nœuds	46
Figure 16 : Exemple de saisie de données pour les conduites	46
Figure 17 : Exemple de saisie de données pour le réservoir	47
Figure 18 : Simulation réussie.....	47
Figure 19 : Exemple de configuration de la qualité	48
Figure 20 : Simulation de la qualité réussie	48
Figure 21 : Concentration en chlore des nœuds de consommation.....	49
Figure 22 : Exemple de simulation de longues durées.....	51
Figure 23 : Téléverser: URL: https://winds.alwaysdata.net/views/v	54
Figure 24 : Diagramme de cas d'utilisation	55
Figure 25 : Logo de l'application	56
Figure 26 : Page de chargement de l'Application.....	56
Figure 27 : Interface de connexion.....	56
Figure 28 : Interface présentant la page d'accueil des paramètres simulés	57
Figure 29 : Interface des statistiques	57
Figure 30 : Interface de déconnexion	58
Figure 31 : Interface de la page des alertes	58
Figure 32 : Schéma explicatif d'automatisation du système.....	59

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS	3
RESUME.....	4
ABSTRACT	5
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES FIGURES.....	7
TABLE DES MATIERES	8
SIGLES ET ABREVIATIONS	11
INTRODUCTION GENERALE	12
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE.....	14
1. Clarification conceptuelle.....	14
1.1 Les équipements hydrauliques du réseau de distribution	14
1.2 Système d'alimentation en eau potable	16
1.2.1 Le captage.....	16
1.2.1.1 Les eaux de surface.....	16
1.2.1.2 Les eaux souterraines.....	17
1.2.2 Le traitement des eaux.....	18
1.2.3 L'adduction.....	18
1.2.4 L'accumulation (stockage)	18
1.2.5 La distribution.....	19
1.2.5.1 Les réseaux maillés.....	19
1.2.5.2 Les réseaux ramifiés	20
1.3 Modélisation des réseaux d'AEP	20
1.3.1 Le modèle hydraulique	21
1.3.2 Le modèle qualité	21

1.4 Qualité de l'eau potable dans les réseaux de distribution.....	22
1.5 La désinfection au chlore.....	22
1.6 Normes togolaises de qualité d'eau potable	22
1.7 Facteurs influençant la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution	23
1.8 Concepts théoriques pour la modélisation de la qualité de l'eau	24
1.9 Les applications mobiles	25
1.10 Exemples des travaux réalisés dans la gestion de la qualité de l'eau appliquant les outils numériques.....	27
CHAPITRE 2 : ZONE D'ETUDE	29
2.1 Présentation de la zone	29
2.1.1 Situation géographique.....	29
2.1.2 Climat.....	30
2.1.3 Topographie	31
2.1.4 Végétation	31
2.1.5 Sols.....	31
2.1.6 Hydrogéologie d'Alinka.....	31
2.1.7 Hydrologie de la zone du projet	32
2.2 Présentation du réseau d'étude et ses caractéristiques	32
CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES	34
3.1 Matériel	34
3.1.2 Logiciels.....	34
3.1.3 Présentation sommaire du logiciel EPANET	34
3.2 Méthodes	39
3.2.1 Critères de dimensionnement	39
3.2.2 Calculs AEP	39
3.2.3 Modélisation du réseau à partir des logiciels	41
3.2.4 Méthode de simulation de la qualité de l'eau et d'analyse	42

3.2.5 Conception de l'application mobile et son fonctionnement.....	44
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	45
4.1 Résultats des calculs AEP	45
4.2 Résultats et interprétations des simulations	46
4.2.1 Résultats des simulations de courtes durées.....	49
4.2.2 Résultats des simulations de longues durées.....	51
4.3 Présentation de l'application	53
4.3.1 Description et utilité de l'application	53
4.3.2 Diagramme de cas d'utilisation.....	54
4.3.3 Fonctionnement.....	55
4.4 Automatisation du système	58
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	61
Références bibliographiques	63

SIGLES ET ABREVIATIONS

AEP : Approvisionnement en Eau Potable

BF : Borne Fontaine

C_{ph} : Coefficient de pointe horaire

C_{ps} : Coefficient de pointe saisonnier

C_s : Consommation spécifique

Q_{dom} : Consommation domestique

Q_{jm} : Consommation journalière moyenne

Q_{non_dom} : Consommation non domestique

C_{pj} : Coefficient de pointe journalier

Q : Débit / Consommation

C : Coefficient

Q_{ph} : Débit de point horaire

Q_{jp} : Consommation du jour de pointe

Q_{mh} : Consommation moyenne horaire

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation

TDE : Société Togolaise Des Eaux

INTRODUCTION GENERALE

Contexte et justification

En Afrique subsaharienne, les défis liés à l'eau sont encore plus marqués. Le Togo par exemple est confronté à des inégalités d'accès à l'eau potable en particulier dans les zones rurales. D'après WASHWatch (2020) environ 40 % de la population rurale togolaise n'a pas accès à une source d'eau potable fiable ce qui entraîne des problèmes de santé et des obstacles au développement économique et social. Ces défis compromettent également l'atteinte de l'Objectif de Développement Durable (ODD) 6, qui vise à garantir l'accès universel à l'eau potable et à l'assainissement d'ici 2030 (Nations Unies, 2015). L'importance de l'eau potable ne se limite pas seulement à sa disponibilité. Une eau contaminée même accessible peut provoquer de graves épidémies. Comme le souligne Ashbolt (2004), les agents pathogènes microbiens présents dans l'eau, tels que les bactéries, virus et parasites, constituent une menace majeure pour la santé humaine. Ces agents sont souvent responsables de maladies diarrhéiques, qui figurent parmi les principales causes de mortalité infantile dans les pays à faible revenu. Dans ce contexte, il est essentiel de mettre en place des systèmes de surveillance efficaces pour garantir une eau de qualité. Le village d'Alinka au Togo illustre ces défis. Bien que doté d'un réseau d'approvisionnement en eau potable, la qualité de l'eau distribuée reste difficile à surveiller. Les outils de contrôle conventionnels sont souvent insuffisants, coûteux ou peu adaptés aux réalités locales. Pour répondre à ces enjeux, l'innovation technologique peut jouer un rôle déterminant. Le développement d'une application mobile dédiée à la surveillance du chlore résiduel dans l'eau représente une solution prometteuse pour renforcer la gestion des réseaux d'eau potable en milieu rural.

Problématique

L'eau est l'une des ressources les plus précieuses et indispensables à la vie. Elle joue un rôle central dans la santé humaine, les écosystèmes et les activités économiques. Cependant, l'accès à une eau potable de qualité reste un défi mondial, en particulier dans les zones rurales des pays en développement. Selon Bartram et *al.* (2005), la consommation d'eau non potable est l'une des principales causes de maladies hydriques, telles que le choléra, la dysenterie et la typhoïde. Ces pathologies ont des conséquences graves sur la santé publique, notamment sur les populations vulnérables comme les enfants, en affectant leur capacité à aller à l'école et à participer aux activités sociales (Prüss-Ustün et Corvalán, 2006).

Objectifs

L'objectif général de notre étude est de développer une application mobile pour la surveillance en temps réel de la concentration du désinfectant résiduel (chlore libre) aux différents nœuds du réseau d'approvisionnement d'Alinka.

Spécifiquement il s'agira de :

- ❖ Modéliser le réseau de distribution de l'eau avec EPANET.
- ❖ Développer une interface de visualisation des outputs d'EPANET.
- ❖ Elaborer un protocole d'alerte des utilisateurs du réseau en cas d'anomalie.

Ainsi le travail s'articule autour de quatre parties qui sont :

- ❖ Dans la première partie nous faisons la clarification des divers éléments indispensables au fonctionnement d'un réseau d'approvisionnement en eau potable.
- ❖ Dans la deuxième partie nous abordons la présentation de la zone d'étude en mettant accent sur la situation géographique, le climat, la topographie, la végétation, les sols et l'hydrologie ainsi que la présentation du réseau d'étude.
- ❖ Dans la troisième partie nous présentons les données utilisées ainsi que les différents matériels et méthodes puis les logiciels employés pour atteindre le but de notre travail.
- ❖ Dans la quatrième partie nous présentons les résultats couplés de discussion et terminons par une conclusion.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE

Pour tout travail de modélisation, il est important de comprendre les contours, termes techniques du phénomène à modéliser.

1. Clarification conceptuelle

1.1 Les équipements hydrauliques du réseau de distribution

Les principaux composants du réseau de distribution sont :

- ❖ **Conduite** : Assemblage de tuyaux, de leurs pièces de raccord et des ouvrages annexes qui permettent le transport de l'eau entre deux points. Il en existe deux types :
 - Zone d'adduction (de transport, de transfert) : est une conduite (eau brute ou eau potable) qui relie les ressources aux usines de traitement, réservoirs et/ou les zones de consommation, normalement sans desserte aux abonnés ;
 - Zone de distribution : est une conduite assurant la desserte de l'eau potable aux abonnés.
- ❖ **Branchement** : Conduite et accessoires mis en œuvre pour amener l'eau du réseau de desserte jusqu'au point de livraison de l'eau à l'utilisateur abonné, à l'exception des conduites et accessoires privés des immeubles collectifs.

Les équipements du réseau : Ce sont les accessoires du système de distribution (*Figure 1*), on peut citer :

- ❖ **Vannes** : Ce sont des dispositifs destinés à contrôler, à stopper ou à modifier le débit de l'eau. La vanne est équivalente au robinet. Il existe plusieurs types de vannes : à opercule, à clapet, à boisseau...
- ❖ **Ventouses** : Equipements placés sur les points hauts du réseau, ont une triple fonction :
 - Evacuation d'air à haut débit lors de la mise en eau des canalisations ;
 - Admission d'air à grand débit lors de la vidange des canalisations ;
 - Dégazage à faible débit en exploitation.
- ❖ **Vidanges** : Dispositifs réalisés sur les points bas du réseau, permettent de vidanger les conduites pour la réparation des fuites ou bien pour le nettoyage.
- ❖ **Regards** : Ce sont des ouvrages maçonnés rond ou rectangulaires qui se situent au-dessus d'une canalisation et dont le but est de permettre la visite et l'entretien d'une conduite souterraine ainsi le démontage de divers appareils (débit mètre, stabilisateur de pression, compteur...)

- ❖ **Stabilisateurs de pression ou régulateurs de pression** : Ce sont des appareils à deux fonctions :
 - Réducteurs de pression en période de forte consommation (jour)
 - Modulateur pour compenser les pertes de charge en période de faible consommation (nuit).
- ❖ **Poteaux d'incendies** ou bouches d'incendies : Ce sont des dispositifs de lutte contre les incendies. Il s'agit d'un réseau souterrain permettant d'alimenter les fourgons d'incendies par les sapeurs-pompiers.
- ❖ **Topographie du réseau d'eau potable** : c'est une représentation schématique qui détaille les différents nœuds d'un réseau et leurs interconnexions physiques (conduites, pompes, vannes). La disposition des nœuds et des conduites est influencée par la localisation des abonnés, la présence de routes, d'obstacles naturels et d'autres infrastructures existantes.



Figure 1 : Les équipements du réseau : A : vanne, B : ventouse, C : vidange, D : regard, E : stabilisateur de pression, F: poteaux d'incendies

1.2 Système d'alimentation en eau potable

Un système d'alimentation en eau potable (AEP) est un ensemble d'infrastructures et d'installations nécessaires pour satisfaire tous les besoins en eau potable d'une zone urbaine, péri-urbaine et industrielle (Blindu, 2004). La figure 2 présente les différents composants dont le captage (1,3), le traitement (5), le transport (2, 6,8), le stockage (7) et la distribution de l'eau potable (9) chez les différents consommateurs (10).

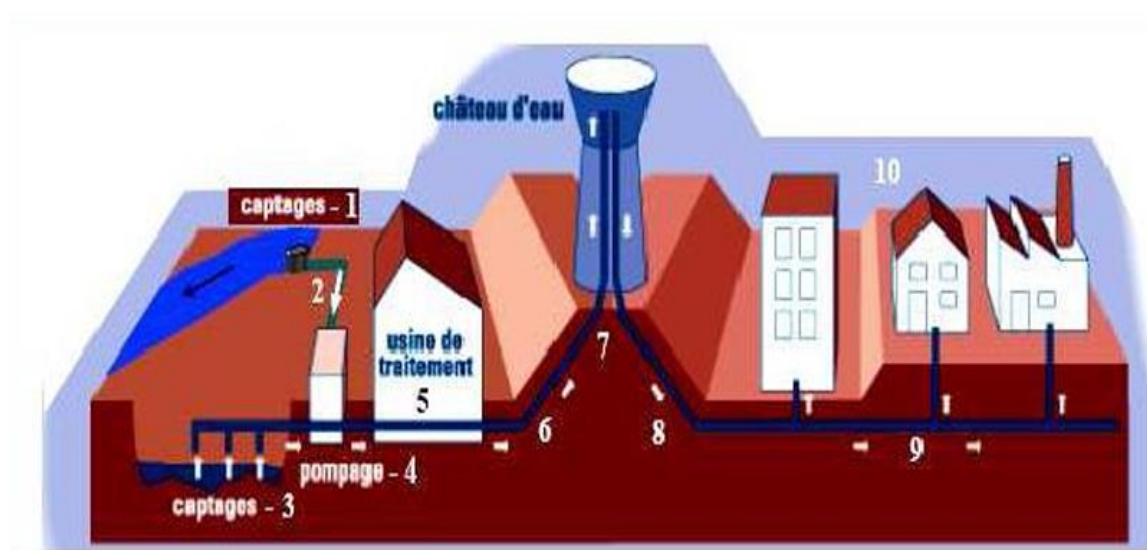


Figure 2 : Éléments d'un système d'AEP (Blindu, 2004)

1.2.1 Le captage

Les captages sont les travaux effectués pour prélever les eaux naturelles en vue de l'alimentation, ils peuvent concerner soit l'eau présente dans le sous-sol, sous forme de nappe aquifère, soit celle qui surgit du sous-sol à la surface par des sources, soit encore celle que l'on trouve à la surface du sol, dans les rivières ou des étangs naturels ou artificiels (Bonnin, 1982).

1.2.1.1 Les eaux de surface

Les eaux de surface font référence à l'eau qui se trouve à la surface de la Terre, généralement dans des rivières, des lacs, des océans, des étangs et des cours d'eau (figure 3). Elles proviennent principalement des précipitations telles que la pluie et la fonte des neiges, ainsi que de la collecte dans des bassins versants. Ces eaux de surface jouent un rôle vital dans l'approvisionnement en eau, l'irrigation agricole, la production d'énergie hydroélectrique, etc. Elles sont prélevées par

différentes méthodes (pompage, captage, etc.). Les prélèvements dans les eaux de surface doivent être gérés de façon à concilier les débits du cours d'eau et les besoins des consommateurs. Elles sont également essentielles pour la faune et la flore aquatiques et jouent un rôle dans la préservation de l'écosystème. Cependant, elles sont vulnérables à la pollution et à l'exploitation excessive, ce qui souligne l'importance de leur gestion durable (Laborde, 2009).



Figure 3 : Les eaux de surface (Lac)

1.2.1.2 Les eaux souterraines

L'eau souterraine est de l'eau qui se trouve sous la surface de la terre. Elle provient de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol, qui s'infiltrent dans les pores, les microfissures et les fissures des roches, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable. Là, elles s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère. Les nappes souterraines cheminent en sous-sol sur la couche imperméable, en suivant les pentes, parfois pendant des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau. Les eaux souterraines sont caractérisées par une qualité constante et bénéficient d'une meilleure protection contre les pollutions par rapport aux eaux de surface. On peut la collecter à sa source ou directement dans le sous-sol via des forages. Tant les eaux souterraines que les eaux de surface doivent être réglementées et protégées. Cette réglementation est obligatoire pour tous les points de prélèvement qui ne disposent pas d'une protection naturelle efficace (Marsily & Besbes, 2017). La figure 4 présente le cycle de l'eau.

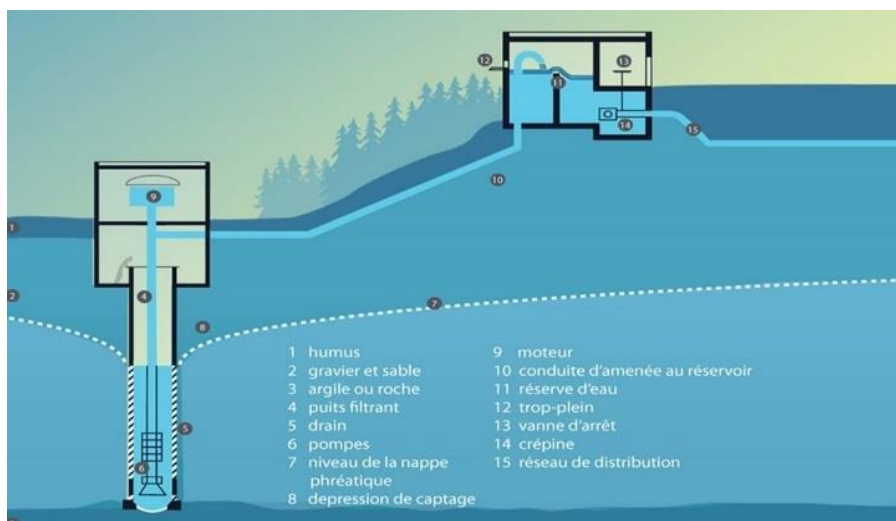


Figure 4 : Captage des eaux souterraines

1.2.2 Le traitement des eaux

Les eaux captées dans la nature, exactement les eaux de surface (lacs, rivières, retenues artificiels), ne présentent pas les qualités physiques, chimiques et biologiques désirables pour la consommation (Bonnin, 1982). Pour rendre ces eaux potables, il faut les traiter aux moyens des stations de traitement.

1.2.3 L'adduction

L'adduction d'eau regroupe les techniques permettant d'amener l'eau depuis sa source à travers un réseau de conduites vers les lieux de consommation ou les stations de traitements. Il y a deux types d'adduction :

- ❖ L'adduction gravitaire
- ❖ L'adduction par refoulement

1.2.4 L'accumulation (stockage)

Les réservoirs doivent maintenir l'eau à l'abri des risques de contaminations, et autant que possible des fortes variations de température (Benblidia & Thivet, 2010). Il sert aussi à deux choses :

- ❖ Constituer une réserve d'eau disponible même si le pompage est arrêté.
- ❖ Séparer le pompage de la distribution.

A partir du réservoir, l'eau s'écoule dans les tuyaux par son propre poids, donc plus le réservoir sera plus haut, plus l'eau pourra aller loin et vite.

1.2.5 La distribution

Elle désigne toute la partie se situant après le réservoir. A partir du ou des réservoirs, l'eau est distribuée dans un réseau de canalisations sur lesquelles les branchements seront piqués en vue de l'alimentation des abonnés. Les canalisations devront en conséquence présenter un diamètre suffisant, de façon à assurer le débit maximal avec une pression au sol compatible avec la hauteur des immeubles (*Dupond, 1981*).

1.2.5.1 Les réseaux maillés

Un réseau maillé, ou réseau complexe, est constitué de segments agencés de manière à former une ou plusieurs boucles fermées, appelées mailles, le long de son tracé confer *figure 5*. Ce type de configuration, bien qu'exigeant en termes de conception, est particulièrement adapté aux zones urbaines densément peuplées où la majorité des habitants disposent de branchements individuels et où la demande en eau est élevée.

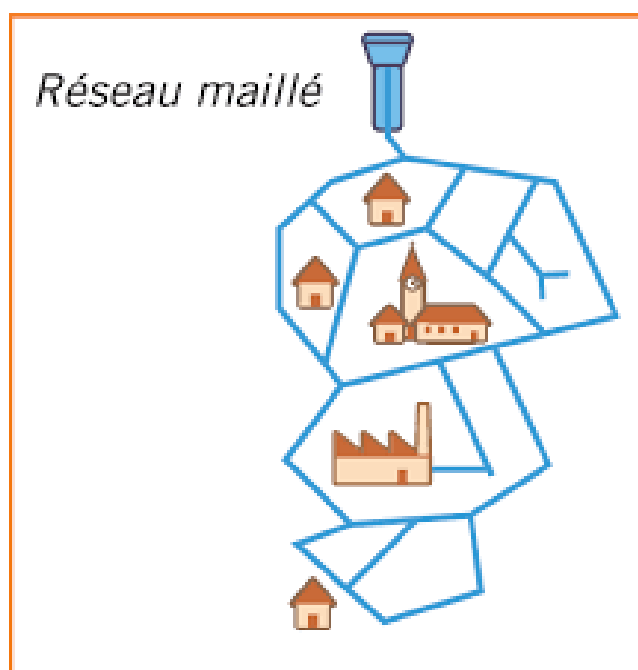


Figure 5 : Illustration du réseau maillé

1.2.5.2 Les réseaux ramifiés

Dans un réseau de distribution, le réseau ramifié est celui qui utilise le moins de canalisations et permet à l'eau de s'écouler dans un seul sens. Il est constitué de telle sorte qu'il est impossible de décrire une boucle fermée en suivant le tracé des canalisations confer *figure 6*. On aura que des tronçons en série et des 4 bifurcations. Ce type de distribution est économique, mais présente l'inconvénient d'interrompre la distribution dans les conduites situées en aval d'un point lorsqu'un arrêt survient en ce point. Pour éviter ces désagréments, l'on utilise un autre type de réseau qui est le réseau maillé. Quoi qu'il en soit, l'ossature principale du réseau de distribution se présente sous la forme d'un réseau ramifié.

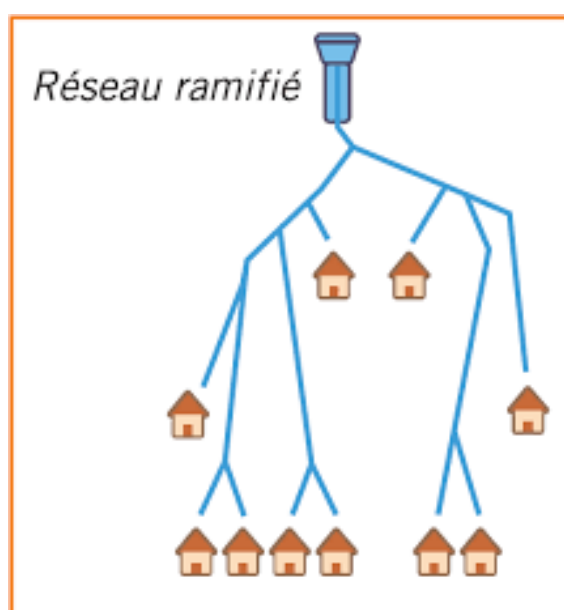


Figure 6 : Illustration du réseau ramifié

1.3 Modélisation des réseaux d'AEP

La modélisation est la conception d'un modèle qui permet la représentation d'une situation du monde réel d'une façon plus simple et facile à appréhender. L'utilisation des logiciels de modélisation facilite grandement l'analyse du fonctionnement du réseau.

La modélisation du réseau d'AEP peut être utilisée à plusieurs fins :

- ❖ Description de la réalité complexe de l'hydraulique ;
- ❖ Gestion des réseaux d'alimentation en eau potable ;
- ❖ Modélisation des concentrations résiduelles de chlore en réseau ;
- ❖ Détermination du degré de mélange d'eau provenant de différentes sources d'approvisionnement dans un réseau ;

- ❖ Evaluation des effets sur la qualité d'eau provenant d'une perturbation du réseau et prédiction de l'évolution des sous-produits de désinfection et la propagation du contaminant en réseau.

Le processus de modélisation des réseaux d'AEP permet l'élaboration de deux types de modèles:

1.3.1 Le modèle hydraulique

Un modèle hydraulique est une représentation mathématique du réseau de distribution permettant la simulation de son fonctionnement hydraulique (Gnamba et *al.*, 2020). Il regroupe les différents éléments constitutifs d'un réseau : les conduites, certaines vannes et appareils de régulation, les pompes, les réservoirs et les interconnexions (nœuds). Le modèle est basé sur une représentation schématique du réseau sous forme de nœuds et de tronçons.

1.3.2 Le modèle qualité

Ce modèle cherche à décrire le temps de séjour (stagnation de l'eau) de l'eau dans le réseau. En effet des temps de séjour importants altèrent la qualité de l'eau dans le réseau. L'objet du modèle est de mesurer l'évolution d'un produit à titre d'exemple, le chlore dans le réseau et d'en mesurer les concentrations à des points précis du réseau.

Pour effectuer les analyses utiles il peut avoir :

- ❖ **Le temps de séjour (l'âge de l'eau)** : c'est le temps passé par une particule d'eau dans le réseau (Rossman, 2000). Il a deux objectifs qui sont :
 - Assurer un temps de contact avec le chlore ;
 - Eviter une détérioration de la qualité avec le temps.
- ❖ **Dépistage des sources/ contaminants** : le traçage ou le dépistage de la source suit dans le temps le pourcentage d'eau d'un nœud de source particulier qui atteint n'importe quel nœud de jonction dans le réseau.
- ❖ **Accroissement ou décomposition des contaminants** : consiste à simuler l'accroissement ou la décomposition des constituants chimiques ou biologiques dans le réseau d'alimentation en eau ; exemples de traceur non réactif comme le fluorure ou le sodium, de désinfectant comme le chlore.

1.4 Qualité de l'eau potable dans les réseaux de distribution

Une eau potable ne doit contenir en quantités dangereuses ni micro-organismes ni substances chimiques nocives pour la santé humaine. L'eau du robinet qui arrive au consommateur passe en premier temps par une série de traitements physico chimiques pour la rendre conforme aux normes de potabilité. Elle est par la suite livrée aux usagers à travers un réseau de distribution étroitement surveillée par les services de l'eau potable et de l'assainissement afin d'éviter les pollutions et les contaminations bactériennes. Le contrôle de la qualité de l'eau potable est assuré à trois niveaux :

- ❖ Le service de production,
- ❖ Le service de distribution,
- ❖ Le ministère de santé (service d'hygiène).

1.5 La désinfection au chlore

Notre étude porte sur le suivi de la concentration du désinfectant résiduel (chlore libre) aux différents nœuds du réseau. La désinfection par le chlore libre résiduel est une étape primordiale du traitement d'eau car elle permet l'inactivation d'organismes pathogènes. À la sortie de l'usine, une désinfection secondaire est habituellement réalisée afin de pouvoir maintenir un résiduel de désinfectant dans l'ensemble du réseau de distribution.

Selon l'OMS, l'eau de boisson doit contenir entre 0,5 et 1 mg/l de chlore résiduel libre (FAO, 2015). Si l'eau est stockée dans de bonnes conditions (dans un réservoir opaque et fermé), ce chlore résiduel éliminera tout risque de nouvelle contamination après le traitement.

Le chlore est disponible sous différentes formes :

- ❖ Solide (tablettes de dichloroisocyanurate de sodium ou DCCNa) ;
- ❖ Liquide (eau de Javel ou hypochlorite de sodium).

1.6 Normes togolaises de qualité d'eau potable

Le décret n°2012-258/PR de 17 Octobre 2012 fixe les normes nationales et les modalités de contrôle de la potabilité des eaux destinées à la consommation humaine. Ce décret a repris la liste intégrale de la directive de l'OMS sur la qualité de l'eau de boisson de 2006 (FAO, 2015).

Tableau 1: Directive de qualité des paramètres physico-chimiques de l'eau de boisson (FAO, 2015)

ELEMENTS	VALEURS INDICATRICE
Cuivre	2 mg/L
Cyanure	0,07 mg/L
Fluorures	1,5 mg/L
Manganèse	0,4 mg/L
Mercure	0,001 mg/L
Nitrate	50 mg/L
Ammonium	0,5 mg/L
Plomb	0,01 mg/L
Chlore	5mg/L
Couleur	15 mg Pt-Co/l
Température	20 °C
Conductivité	> 180 et ≤ 1100 µS/cm
Turbidité	5 UTN (unité de turbidité néphélométrie)
Aluminium	0,2 mg/L
Chlorure	0,3 mg/L
Dureté	-
Fer	0,3 mg/L
pH	6,5-9,5
Sodium	200 mg/L
Sulfate	500 mg/L
Solides totaux en solution	1000 mg/L
Zinc	3 mg/L

1.7 Facteurs influençant la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution

Le réseau de distribution de l'eau potable est souvent décrit comme un véritable réacteur où l'eau et son contenant (conduite) sont le siège d'interactions physicochimiques et biologiques qui font que l'eau du robinet peut avoir une qualité très éloignée de celle issue de l'usine de production. Les conditions qui contrôlent l'évolution de la qualité de l'eau dans le réseau sont complexes et ont fait l'objet ces dernières années d'une recherche approfondie. Une bonne

connaissance des facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau dans les réseaux est indispensable pour les services d'exploitation (en usine de production ou sur le réseau) afin d'anticiper et d'éviter des problèmes potentiels.

Il y a plusieurs facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'eau potable dont l'on peut citer : Les facteurs organoleptiques, les facteurs physicochimiques, les facteurs bactériologiques, les facteurs hydrauliques, les facteurs indésirables et toxiques et les facteurs liés à la structure des conduites. Ces facteurs doivent respecter les normes togolaises relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine.

1.8 Concepts théoriques pour la modélisation de la qualité de l'eau

- ❖ **Transport par advection dans les conduites** : une substance dissoute parcourt la longueur d'une conduite avec la même vitesse moyenne que le fluide porteur tout en réagissant à une vitesse donnée.
- ❖ **Mélange de masse aux jonctions des tuyaux** : tous les modèles de la qualité de l'eau supposent que le mélange des fluides est complet et instantané aux jonctions recevant de l'eau de deux tuyaux ou plus.
- ❖ **Mélange dans les réservoirs** : il est possible d'utiliser quatre différents modèles pour caractériser le mélange dans les réservoirs de stockage :
 - Mélange parfait ;
 - Mélange en deux compartiments ;
 - Écoulement en piston type FIFO ;
 - Écoulement en piston type LIFO.
- ❖ **Réaction modifiant la qualité de l'eau** :
 - **Réaction dans la masse d'eau** (Rossman, 2000):

$$R = K_b C^n \quad (eq.1)$$

C : concentration du réactant (masse /volume)

K_b : coefficient de la vitesse de réaction

n : l'ordre de la réaction

$$R = K_b (C_L - C) C^{n-1} \quad \text{pour } n > 0, K_b > 0 \quad (eq.2)$$

$$R = K_b (C - C_L) C^{n-1} \quad \text{pour } n > 0, K_b < 0 \quad (eq.3)$$

C_L : concentration limitante

Tableau 2 : Quelques exemples de réactions (Rossman, 2000)

Modèle	Paramètres	Exemples
Décomposition d'ordre Un	$C_L = 0, K_b < 0, n = 1$	Chlore
Accroissement d'ordre Un Jusqu'à saturation	$C_L > 0, K_b > 0, n = 1$	Trihalométhanes
Cinétique d'ordre zéro	$C_L = 0, K_b < > 0, n = 0$	Temps de séjour
Sans réaction	$C_L = 0, K_b = 0$	Marqueur de fluorure

- **Réaction aux parois** (Rossman, 2000) : $R = (A / V) K_w C^n$ (eq.4)

K_w : Coefficient de la vitesse de réaction (longueur / temps).

(A / V) : Rapport de la surface intérieure du tuyau avec le volume intérieur.

C : concentration du réactant (masse / volume).

n : l'ordre de la réaction.

1.9 Les applications mobiles

❖ Histoire

Les applications mobiles ont commencé à apparaître avec les assistants personnels et des jeux très simples sur les téléphones mobiles dans les années 1990. L'incarnation actuelle a réellement commencé avec le lancement de l'App Store d'Apple en juillet 2008, suivi rapidement par l'Android Market, qui deviendra le Play Store de Google. (F. Auclert)

App Annie, une société spécialisée dans l'analyse de données mobiles, a profité de la fin de cette décennie pour dresser la liste des applications les plus populaires des dix dernières années. App Annie a dressé la liste des 10 applications et des 10 jeux les plus téléchargés depuis 2010 pour IOS et 2012 pour Google Play, ainsi que ceux qui ont eu les plus gros revenus. (F. Auclert)

Les applications mobiles sont adaptées aux différents environnements techniques des Smartphones et à leurs contraintes et possibilités ergonomiques (écran tactile notamment). Elles permettent généralement un accès plus confortable et plus efficace à des sites ou services accessibles par ailleurs en versions mobile ou web. L'essentiel du temps passé sur les Smartphones est consacré à des applications mobiles. Reflet du succès commercial et technique de l'iPhone, une grande majorité des applications mobiles furent créées à l'origine pour le téléphone mobile d'Apple. Cependant, les applications Android se sont fortement développées depuis les années 2010 / 2011 et dépassent désormais en nombre d'installation les applications iPhone. (BOITMOBILE)

❖ Définition

Une application mobile est un programme autonome conçu pour s'exécuter sur un terminal mobile, comme un smartphone ou une tablette. Elle a donc accès à toutes les fonctions « natives » de ces appareils : GPS, appareil photo, etc. Comme tout programme, elle doit donc être téléchargée au préalable pour être installée (Djamah et al., 2016).

❖ **Application iPhone** : c'est un type d'applications mobiles spécialement développée pour l'iPhone d'Apple. Le développement d'une application iPhone permet de profiter du succès commercial de mobiles et de ses qualités d'usage. L'usage des fonctionnalités tactiles et de navigation de l'iPhone permet un accès en mobilité à des services proposés par un site de manière plus confortable et plus efficace qu'en passant par un accès web, même s'il est optimisé pour les accès mobiles. Les applications iPhone s'obtiennent sur l'« Apple Store » (Djamah et al., 2016).

❖ **Application Androïde** : Une application Android est une application mobile spécifiquement développée pour smartphones utilisant le système d'exploitation Android. Comme les applications iPhone dont elles sont souvent des répliques, les applications Android sont de nature très variables :

- Jeux ;
- Mobile commerce ;
- Utilitaires ;
- Services d'informations, etc.

Les applications Android s'obtiennent sur l'« GooglePlay » (Djamah et al., 2016).

❖ Avantages et inconvénients d'application mobile

Comme avantage :

- Une parfaite ergonomie est assurée pour les applications mobiles en comparaison aux sites mobiles cela encourage les utilisateurs à demeurer fidèles aux applis. En effet, le développement d'application mobile tient compte la taille du Smartphone, le temps de chargement et autres paramètres.
- Les applications mobiles favorisent l'intégration des options de téléphone et ainsi, l'expérience utilisateur devient plus développée.
- Pas besoin d'avoir accès à l'internet pour que l'application fonctionne.
- Facile à trouver sur les stores par rapport aux sites mobiles, les applications mobiles ont connu ainsi un usage plus répandu auprès des jeunes surtout qu'elles notifient sur les événements en cours

Comme inconvénient :

- La soumission aux normes et règles éditées par les sociétés des plateformes mobiles à savoir Apple, Google, Windows et autres.
- Un investissement lourd pour le développement d'une application mobile adaptée à chaque système d'exploitation mobile contrairement au coût qu'exige le développement d'un site mobile.
- Lors de toute mise à jour d'application mobile, le mobinaute se trouve dans l'obligation de la faire à travers le store alors que le site mobile se met à jour d'une manière automatique.

❖ **Les types des applications mobiles**

- **L'application native**

Ce type d'application représente la majorité des applications que nous téléchargeons chaque jour. Une application native est une application mobile qui est développée spécifiquement pour un des systèmes d'exploitation utilisé par les Smartphones et tablettes (IOS, Android, etc.)

- **L'application web**

Une application web (ou web App) est une application hébergée sur un serveur et accessible depuis un navigateur web. Contrairement à une application mobile, aucune installation n'est nécessaire ouvrant la porte à de nombreux avantages.

- **L'application hybride**

Situé entre l'application mobile et web, l'application hybride ou dite application cross-plateformes est accessible sur toutes les plateformes d'application. Il s'agit d'une application mobile qui fusionne entre les caractéristiques d'une application web

1.10 Exemples des travaux réalisés dans la gestion de la qualité de l'eau appliquant les outils numériques

Exemples de recherches réalisées dans la gestion de l'eau en appliquant les outils numériques à l'échelle mondiale :

- L'OMS recommande l'intégration des outils numériques dans une approche de gestion proactive (WHO, Water Safety Planning for Small Community Water Supplies, 2012).
- Par ailleurs, des travaux de Boulos et al. (2006), dans leur article Real-Time Water Quality Management Using Mobile Technologies, soulignent que les systèmes de surveillance

numérique améliorent la capacité des gestionnaires à détecter et résoudre rapidement les problèmes de contamination.

- En Afrique subsaharienne, l'UNICEF a également mis en lumière l'impact positif de ces technologies dans son rapport (State of the World's Children, 2019).
- En Afrique de l'Ouest, (Diop-Seck, 2022) souligne l'impact positif de la surveillance automatique en ligne de la pollution des eaux naturelles.
- Les travaux de (Khatri & Vairavamoorthy, 2012) ont mis en évidence l'importance d'outils numériques pour améliorer la gestion des réseaux d'eau.
- De même, (Dillon et al., 2020) ont démontré l'efficacité des applications mobiles dans le suivi des infrastructures hydrauliques.
- (Mokhbat, 2024) « Réalisation et Implémentation d'un Système Avancé pour le monitoring Intelligent de la Qualité de l'Eau pour application industrielle ». A présenté la conception et la réalisation d'un système de surveillance de la qualité de l'eau basé sur l'Internet des Objets (IoT). Utilisant des capteurs connectés à un module ESP32 et des logiciels tels que Arduino IDE et FRITZING, le système lui a permis de mesurer en temps réel des paramètres clés de la qualité de l'eau, notamment la température, la conductivité électrique, les solides dissous totaux (TDS) et la turbidité. Les données collectées sont transmises via Wi-Fi à une application Télégramme pour une surveillance à distance.

En conclusion, ce chapitre a abordé les éléments fondamentaux qui ont servi de fondement à l'avancement de l'étude.

CHAPITRE 2 : ZONE D'ETUDE

Ce chapitre est réservé pour la présentation de la zone d'étude. L'accent a été mis sur la situation géographique, le climat, la topographie, la végétation, les sols et l'hydrologie ainsi que la présentation du réseau d'étude.

2.1 Présentation de la zone

2.1.1 Situation géographique

Le Togo est un pays l'Afrique de l'Ouest. Il est situé entre les 6ème et 11ème degré de latitude Nord et le méridien 0° et 1°40 de longitude Est. Il est limité au Nord par le Burkina Faso ; au Sud par l'Océan Atlantique ; à l'Est par le Bénin et à l'Ouest par le Ghana. Il a une superficie de 56 785 km² pour une population de 8 095 498 habitants selon le dernier recensement (RGPH-5) 2022. Sa capitale est Lomé. Alinka, cœur de notre zone d'étude est limitée au Nord par le fleuve Zio, au Sud par le Camp Fir, à l'est par la localité d'Akoin et à l'Ouest par le canton d'Assomé avec une superficie de cinq cent vingt-deux (522) hectares et une population estimée à 3000 habitants (RGPH-022), c'est un quartier périphérique de la ville de Lomé dans la commune d'Agoè Nyivé 4 et est située dans le bassin sédimentaire côtier du Togo dont l'altitude maximale ne dépasse guère 20 m. Ce bassin est constitué de six petits plateaux d'altitude inférieure à 100 m délimités par la dépression de la Lama et par les vallées des principaux cours d'eau (Zio, Haho, Lili).

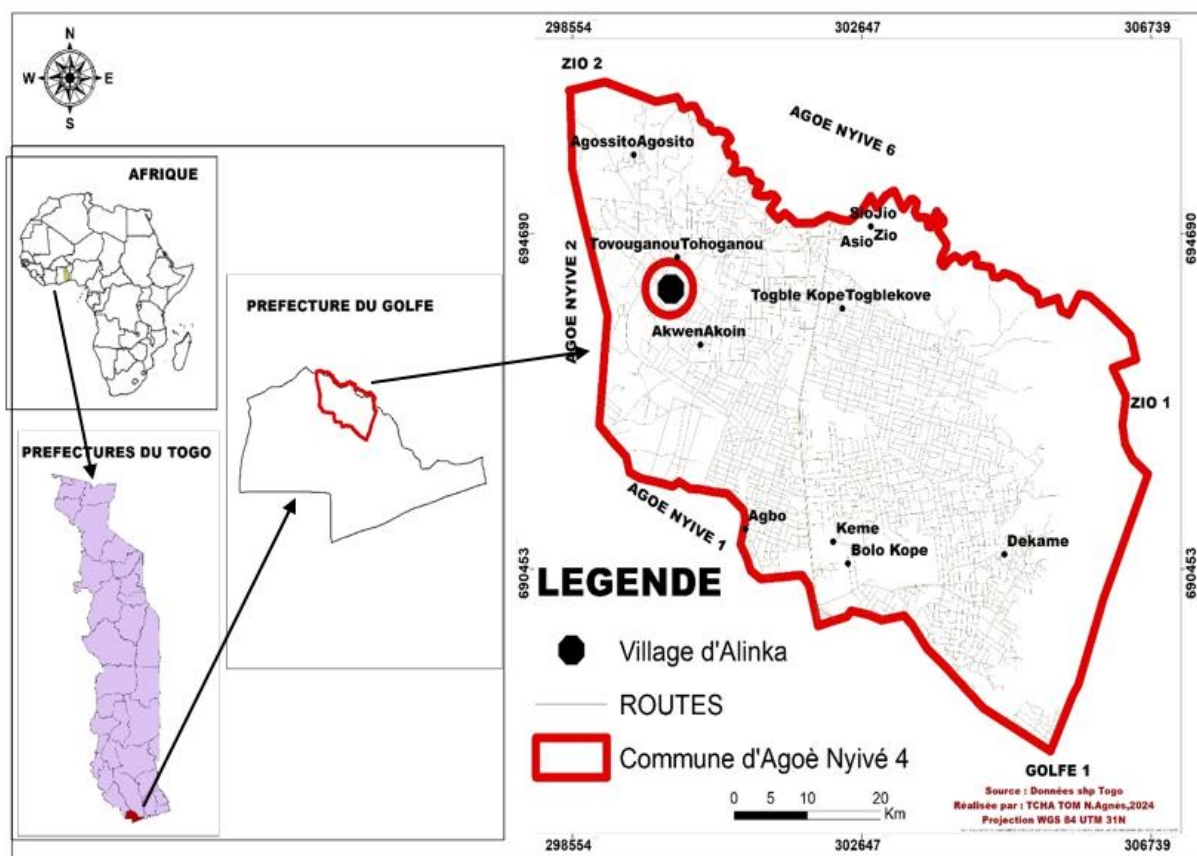


Figure 7: Carte de localisation du Village d'Alinka

2.1.2 Climat

Tout comme celui de la région Maritime, le climat d'Alinka dans la commune d'Agoè-Nyivé 4 est subéquatorial de type guinéen caractérisé par l'alternance de deux saisons pluvieuses et de deux saisons sèches :

- ❖ Grande saison des pluies : mars à juillet ;
- ❖ Petite saison sèche : juillet à septembre ;
- ❖ Petite saison de pluies : septembre à novembre ;
- ❖ Grande saison sèche : novembre à mars.

Les précipitations sont en moyenne de 900 mm de pluies par an (due à l'anomalie climatique du sud Togo) et d'une grande intensité surtout dans les mois de juin et octobre entraînant souvent des inondations. Toutefois, avec le dérèglement climatique de ces derniers temps, on observe un décalage de ces saisons. Les variations thermiques sont assez faibles. Les températures les plus élevées sont observées en février - mars (32°C) et les minimas en juillet-Août (21°C). Alinka est sous l'influence de deux grands vents :

- L'alizé continental : Harmattan, vent chaud, sec et poussiéreux provenant des hautes pressions du Sahara, soufflant du Nord-Est au Sud-Ouest de fin novembre à janvier ;

- L'alizé maritime : c'est un flux d'air chaud et humide de direction Sud–Ouest au NordEst et qui souffle d'août à septembre annonçant la plupart du temps la petite saison pluvieuse.

2.1.3 Topographie

Le relief de la zone est monotone et peu contrasté. Le milieu physique se caractérise par le plateau continental constitué par la terre de barre. Alinka est située dans une dépression (bassin de zio), d'où le nom Togblékopé, champ de l'eau.

2.1.4 Végétation

La flore d'Alinka se compose essentiellement d'arbustes, de touffes d'herbes éparses et des vestiges de forêts sacrées. Cette végétation peu fournie est le résultat d'actions anthropiques. Elle se résume aux arbres plantés, ceux des espaces verts et des jardins publics et privés.

2.1.5 Sols

On distingue trois types de sols à savoir les sols du cordon littoral et lagunaire composés de sable marin, les sols inondés des vallées alluviales (sols hydromorphes) dans les zones de dépression, le long du Zio et les sols du plateau continental terminal à la couleur rouge appelés terre de barre.

2.1.6 Hydrogéologie d'Alinka

Le pendage général de la série sédimentaire est dirigé vers le sud. Au droit du littoral, à proximité de Lomé, un forage rencontrerait successivement depuis la surface :

- ❖ Les formations dunaires
- ❖ Les dépôts du Continental Terminal ;
- ❖ Les horizons de l'Eco-Paléocène (Tertiaire) ;
- ❖ Et enfin les formations du Maestrichtien (crétacé supérieur) dont la base se trouve à environ 700 m de profondeur à droit de Lomé.

Chacun de ces quatre ensembles géologiques peut constituer un aquifère lorsque la lithologie des formations qui le composent est compatible avec l'existence d'une porosité ouverte ou d'une fracturation suffisante. Le cas échéant, l'exploitabilité du réservoir dépend alors de l'importance de son alimentation. Les principaux niveaux aquifères sont sableux dans le Continental Terminal, calcaires dans le Paléocène et sableux dans le Maestrichtien (Yikpa et *al.*, 2019).

2.1.7 Hydrologie de la zone du projet

D'une façon générale, l'hydrologie peut être définie comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation des différents flux.

Alinka est ainsi drainé principalement au Nord par la rivière Zio et son affluent Towougan. Le Zio prend sa source à 726 m d'altitude dans les monts Tabadia, sa longueur est de 175 km et draine un bassin de 2 806 km² (ORSTOM, 1961). Etant situé au sud du parallèle 7°20' de latitude Nord, le Zio est soumis à un régime à deux saisons des pluies se rapprochant beaucoup d'un régime équatorial et il présente généralement deux pointes de crue annuelles, la première en Mai, Juin ou Juillet, la deuxième en Septembre. Les périodes de forts débits se situent entre les mois de Juin et Octobre avec un maximum de 18.4 m³/h dans le mois de Juillet. Le débit est faible autour des mois de Novembre à Mai et est égal à 2 m³/h. Ce cours d'eau est alimenté par des précipitations efficaces pendant les mois de Mai à Novembre, correspondant en général aux périodes de pluie. La lame de pluie moyenne reçue par le bassin de Zio est de 1200 mm.

2.2 Présentation du réseau d'étude et ses caractéristiques

Le réseau de distribution d'eau potable d'Alinka a été réalisé en 2022 mais son exploitation a débuté en début de l'année 2024 à cause de quelques soucis techniques. Il est constitué d'un réservoir qui est de volume de 100 m³, d'un poste de chloration et d'une station de pompage. Il est constitué des conduites en PVC (Polychlorure de vinyle) dont les diamètres sont de 75 mm, 90 mm et 110 mm ; en Fonte DN 300 mm et en PEHD DN 200 mm avec des équipements et composants divers (vannes, vidanges, ventouses etc.). Sur les tronçons de conduites sont branchés les abonnés et les bornes fontaines qui sont au nombre de six. Le réseau dessert une population de plus 3000 habitants. C'est un réseau ramifié.

Tableau 3: Caractéristiques du réservoir

Caractéristiques du réservoir	Unités	Valeurs
Volume	[m ³]	100
Hauteur utile	[m]	6,5
Diamètre	[m]	4,425

Tableau 4: Caractéristiques du réseau tracé avec des logiciels

Tronçons	L[m]	ZTN aval [m]
BF4-N5	463,7	18
BF5-N5	100	18
BF3-N10	791,6893	22
BF2-N10	440,355	18
BF6-N10	406,355	18
n5-BF1	100	20
BF1-N10	100	20
CE-BF1	461,57	39,49

En conclusion, la présentation de la zone d'Alinka détaille les informations indispensables pour comprendre les dynamiques complexes du système hydrologique de ce village et pour appuyer nos analyses ultérieures.

CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES

Cette partie présente les différents types de données utilisés ainsi que les différents matériels et logiciels employés pour atteindre le but de notre travail.

3.1 Matériel

3.1.1 Données

Plusieurs données ont été utilisées dans cette étude, ces données ont été choisies pour leur pertinence pour l'étude. Il s'agit du plan de récolement d'ensemble du réseau AEP d'Alinka (fichier autocad et fichier physique).

Les données d'entrée dans EPANET sont :

- ❖ **BF** : nous avons utilisé les coordonnées géographiques
- ❖ **Conduites** : nous avons utilisé la longueur, le diamètre ainsi que le coefficient de rugosité,
- ❖ **Réservoir** : le niveau initial d'eau, les niveaux minimal et maximal d'eau, le diamètre du réservoir ainsi que l'élévation ;
- ❖ **Données de qualité** : nous avons utilisé la qualité initiale de l'eau (chlore).

3.1.2 Logiciels

- ❖ **QGIS** : QGIS ou Quantum GIS est un logiciel de système d'information géographique (SIG) gratuit et open source, permettant aux utilisateurs de créer, éditer, visualiser, analyser et publier des données géo-spatiales. Il a été utilisé pour élaborer la carte de la zone d'étude.
- ❖ **AUTOCAD, Google Earth, Global Mapper** : Tous des logiciels de SIG ont été servi pour le traçage du réseau de distribution.
- ❖ **EPANET** : Il a été utilisé pour les différentes simulations du réseau.

3.1.3 Présentation sommaire du logiciel EPANET

Epanet, développé aux États-Unis, dispose également d'une version française issue d'une initiative de la Compagnie Générale des Eaux. Ce logiciel est largement utilisé pour analyser le comportement hydraulique et la qualité de l'eau dans les réseaux sous pression, principalement pour deux raisons : il est gratuit et accessible à tous (étudiants, entreprises, bureaux d'études, etc.), et il fournit des résultats fiables. Son objectif est de faciliter la compréhension des flux et de l'utilisation de l'eau dans les systèmes de distribution.

Epanet permet de calculer :

- ❖ Le débit dans chaque conduite ;
- ❖ La pression à chaque nœud ;
- ❖ Le niveau de l'eau dans les réservoirs (Rossman, 2000)
- ❖ La concentration en substances chimiques dans le réseau et le temps de séjour de l'eau dans les différentes parties du réseau et suivre l'origine de l'eau.

Le logiciel offre un environnement intégré pour éditer les données du réseau, exécuter des simulations hydrauliques et de qualité, et afficher les résultats sous divers formats. Il a été développé par le National Risk Management Research Laboratory (NRMRL) de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (U.S.E.P.A.) et distribué gratuitement par l'E.P.A. depuis le mois de septembre 1993 (Rossman, 2000).

Epanet est doté d'un moteur de calcul hydraulique moderne avec les caractéristiques suivantes:

- ❖ La taille du réseau étudié est illimitée ;
- ❖ Il dispose des formules de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach et Chezy-Manning pour calculer les pertes de charge dues à la friction. Ces formules sont laissées au choix de l'utilisateur ;
- ❖ Il sait calculer les pertes de charge singulières aux coudes, joints, etc. ;
- ❖ Il peut modéliser des pompes à vitesse fixe ou variable, l'énergie consommée et le coût de fonctionnement ;
- ❖ Il peut modéliser les différents types de vannes (clapets anti retour, vannes de contrôle de pression, vannes d'arrêt, etc.) ;
- ❖ Il sait modéliser les réservoirs à forme variables ;
- ❖ Il sait modéliser un profil de consommation variable à un nœud ou une consommation dépendante de la pression (asperseur par exemple).
- ❖ Permet la simulation du réseau par commandes simple ou horodatées.

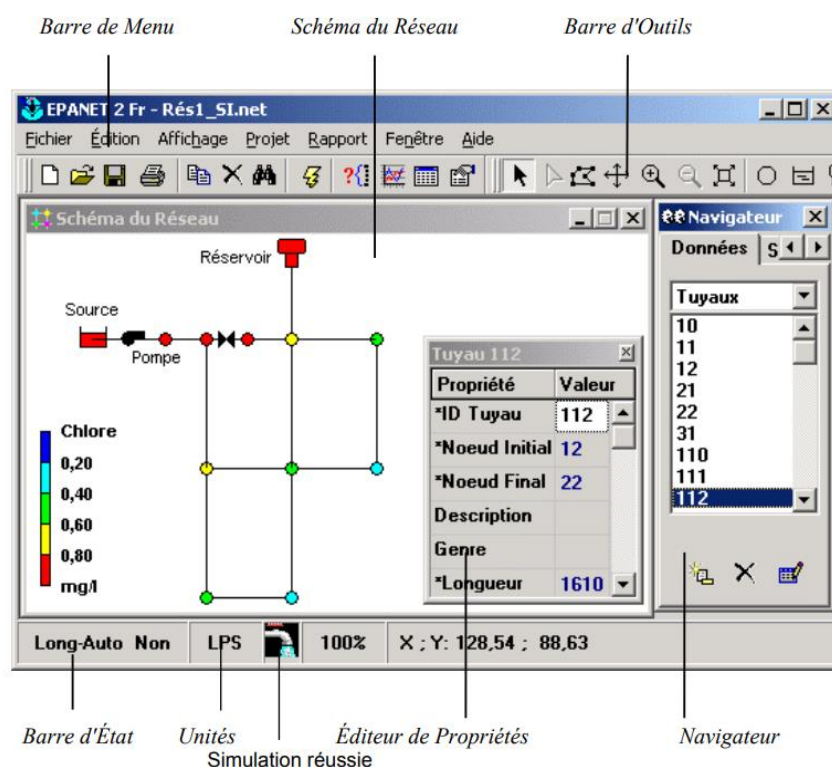


Figure 8: Présentation de l'interface d'EPANET 2.0

Composantes hydrauliques pour la modélisation avec Epanet

❖ Composantes physiques

Epanet modélise un système de distribution d'eau comme un ensemble d'arcs reliés à des nœuds. Les arcs représentent des tuyaux ou conduites, des pompes, et des vannes de contrôle. Les nœuds représentent des nœuds de demande, des réservoirs et des baches. La figure 9 indique les liaisons entre les différents objets formant le réseau.

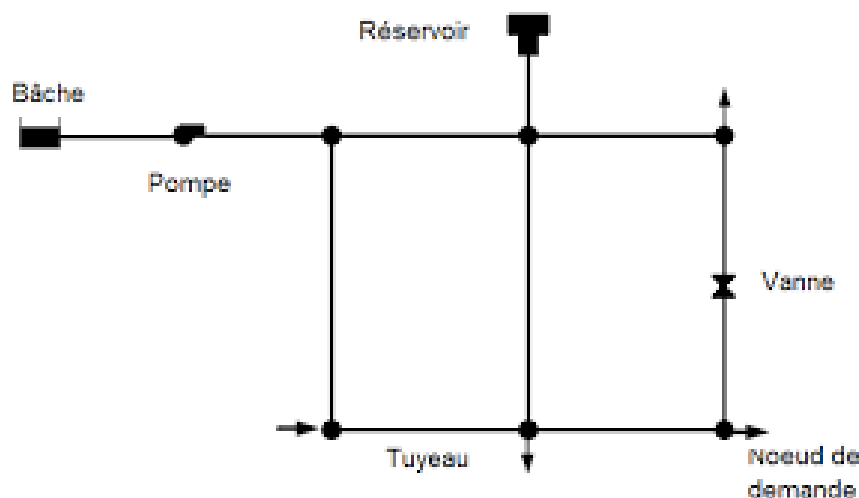


Figure 9: Système de distribution d'eau sur EPANET

❖ Composantes non physiques

En plus des composants physiques, Epanet utilise trois types d'objets non physiques ; à savoir : des courbes, des courbes de modulation et des commandes de contrôle. Ils décrivent le comportement et les aspects fonctionnels d'un système de distribution (*Figure 10*).

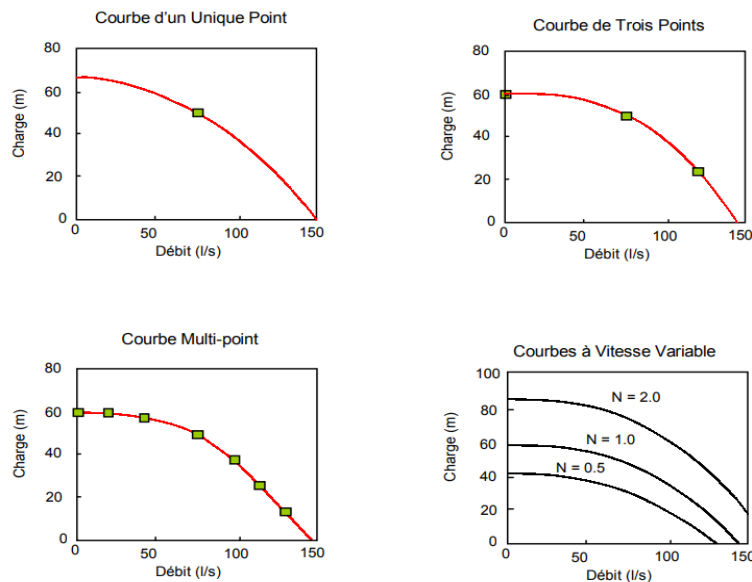


Figure 10: Quelques exemples de courbes caractéristiques

3.1.4. Langages de programmation

❖ Python

Python un langage de programmation polyvalent, interprété et orienté objet, crée en 1991 par Guido Van Rossum. Connu pour sa syntaxe simple et lisible, il est largement utilisé dans les divers domaines comme le développement web, la science des données, l'intelligence artificielle, l'automatisation et la gestion de bases des données. Grâce à son écosystème riche en bibliothèques et Framework, Python permet de développer des applications complexes tout en restant accessibles aux débutants. Ses principaux avantages sont sa simplicité d'apprentissage, sa flexibilité et son portage sur plusieurs plateformes. Il a servi à coder.

❖ WNTR (Water Network Tool for Resilience)

WNTR est une bibliothèque Python open source développée par l'EPA (Environmental Protection Agency) des États-Unis. Elle est utilisée pour simuler et analyser la résilience des réseaux de distribution d'eau. Il est servi à lire le fichier .inp.

❖ **Flutter**

Flutter est un Framework open source sur Google utilisé pour développer des applications mobiles pour iOS et Android. Il utilise le langage de programmation Dart, qui est similaire aux langages C++ et au java. Flutter permet de créer des interfaces utilisateurs personnalisées et fluides pour des applications mobiles. Il a servi à créer les interfaces utilisateurs.

❖ **Dart SDK**

Le Dart SDK est un ensemble d'outils et de bibliothèques pour le développement d'applications avec le langage Dart. Il permet de créer des applications web, mobiles et de bureau avec des fonctionnalités avancées et une compilation native.

❖ **Android SDK**

L'Android SDK est un ensemble d'outils et de ressources pour le développement d'applications Android. Il offre aux développeurs l'accès aux fonctionnalités spécifiques du système Android et facilite la création d'application performantes et attrayantes pour les appareils Android.

❖ **SQLite**

SQLite est une base de données relationnelle légère et intégrée. Contrairement à d'autres systèmes de gestion de bases de données (comme MySQL ou PostgreSQL), SQLite n'a pas besoin d'un serveur pour fonctionner. La base de données est stockée dans un fichier unique sur le disque.

❖ **Flask et SQLAlchemy**

Flask est un Framework Python minimaliste pour le développement d'applications web. Il est léger, facile à utiliser et convient particulièrement aux projets qui nécessitent une structure personnalisée.

SQLAlchemy est une bibliothèque Python utilisée pour interagir avec des bases de données relationnelles. Elle est souvent utilisée avec Flask pour gérer les bases de données. C'est un ORM (Object-Relational Mapper), ce qui signifie qu'il permet de manipuler des bases de données avec du code Python au lieu d'écrire directement des requêtes SQL.

3.2 Méthodes

3.2.1 Critères de dimensionnement

Le dimensionnement d'un réseau de distribution d'eau potable repose sur plusieurs critères essentiels pour garantir un approvisionnement efficace et de qualité. Dans notre cas nous avons parlé du débit moyen journalier et du coefficient de pointe.

❖ Coefficient de pointe

Le coefficient de pointe (C_p) correspond au rapport entre une consommation instantanée et la consommation moyenne sur une période donnée, telle qu'une heure, une journée, une semaine ou un mois. On peut distinguer :

- **Le coefficient de pointe saisonnier (C_{ps})** : correspond au rapport entre la consommation moyenne journalière du mois de pointe et la consommation journalière moyenne de l'année. Il est influencé par divers facteurs tels que les périodes de chaleurs, les variations saisonnières des flux de la population (comme le tourisme). En conditions normales ce coefficient oscille entre 1,10 dans les zones tropicales humides, où l'eau est abondante et les températures sont stables, et 1,20 dans les zones sahéliennes, où l'assèchement cyclique des ressources s'accompagnent de fortes chaleurs.
- **Le coefficient de pointe journalier (C_{pj})** : correspond au rapport entre la demande du jour de pointe. Il reflète la nature cyclique des comportements des utilisateurs au cours de la semaine avec des pics de consommation observés lors des jours dédiés aux grandes lessives ou aux périodes de repos hebdomadaire. Ce coefficient est indépendant des variations saisonnières et fluctue généralement entre 1,05 et 1,15.

Le coefficient de pointe horaire (C_{ph}) : c'est le coefficient qui rend compte de la consommation au cours de la journée. Il exprime donc les habitudes du consommateur au cours de la journée. Il est indépendant de la saison et n'a aucune influence sur les quantités d'eau à mobiliser ; Q_{hm} est la consommation moyenne horaire

$$C_{ph} = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{hm}}} \quad (eq.5)$$

3.2.2 Calculs AEP

Pour pouvoir effectuer la simulation sur EPANET quelques calculs ont été effectués à savoir :

- ❖ Calcul de la population actuelle et estimation de la population à l'horizon 2050 de la zone d'Alinka en se basant sur la population de l'année 2022 la date du dernier RGPH ainsi que le taux d'accroissement qui est de 2,3%.

La population à l'horizon de l'année n peut être évaluée approximativement par l'équation suivante :

$$P_n = P_0(1 + k)^n \quad (eq.6)$$

Avec ;

P_n : La population à l'horizon de l'année n;

P_0 : La population de l'année 0 de référence;

Nous avons adopté $k = 2,3\%$ et $P_0 = 3000$ habitants sur quoi nous avons estimé la croissance démographique du village jusqu'à l'horizon 2050 ;

- ❖ Calcul de la consommation journalière moyenne

$$Q_{jm} = Q_{dom} + Q_{non_dom} \quad (eq.7)$$

- ❖ Calcul de la consommation domestique Q_{dom}

$$Q_{dom} = C_s * P_{BF} \quad (eq.8)$$

Avec ; C_s : Consommation spécifique par borne-fontaine ;

P_{BF} : Population au niveau des bornes fontaines.

- ❖ Calcul de la Consommation non domestique Q_{non_dom}

$$Q_{non_dom} = 10\% Q_{dom} \quad (eq.9)$$

- ❖ Calcul de la consommation du jour de pointe Q_{jp} :

$$Q_{jp} = Q_{jm} * C_{ps} * C_{pj} \quad (eq.10)$$

Avec ; C_{ps} : Coefficient de pointe saisonnier ;

C_{pj} : Coefficient de pointe journalier.

- ❖ Débit de point horaire Q_{ph}

$$Q_{ph} = \frac{Q_{jm} * C_{ps} * C_{pj} * C_{ph}}{\eta \text{ réseau de distribution} * \text{Temps de distribution}} \quad (eq.11)$$

Avec ; η : Rendement de distribution

- ❖ Calcul de C_{ph} (Coefficient de pointe horaire)

$$C_{ph} = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{hm}}} \quad (eq.12)$$

- ❖ Calcul de Q_{hm}

$$Q_{hm} = Q_{jm}/24 \quad (eq.13)$$

- ❖ Débit de pointe au niveau de BF

$$Q_{BF} = Q_{ph_total}/N_{BF} \quad (eq.14)$$

- ❖ Débit de production

$$Q_{prod} = Q_{jp}/16*0,85*0,9 \quad (eq.15)$$

Heure de pompage = 16 h

- ❖ Diamètre utile du réservoir :

V_u = Volume utile

D_u = Diamètre utile

H_u = Hauteur utile

$$V_u = \pi \frac{D_u^2}{4} \times H_u \quad (eq.16)$$

3.2.3 Modélisation du réseau à partir des logiciels

Pour modéliser le réseau, la première étape a consisté à exporter le réseau AEP du village d'Alinka sous le format AutoCAD (DWG) en fichier format INP utilisable sur EPANET. Pour y arriver, nous avons procédé comme suit :

- ❖ Aller sur Google earth et projeter les points de coordonnées des BF ;
- ❖ Créer un dossier pour prendre en compte tout le tracé, tracer la conduite avec l'outil trajet et enregistrer dans un format KMZ avec le repère ;
- ❖ Aller dans global Mapper, paramétrer le logiciel et aller dans file pour importer le fichier y compris le repère ;
- ❖ Aller dans file puis importer le fichier, choisir vectoriel, cliquer sur le format désiré puis OK (format DWG dans autocad) ;
- ❖ Aller dans autocad, ouvrir le fichier, zoomer pour joindre les nœuds ;
- ❖ Enregistrer le fichier sous le format dxf dans autocad ;

- ❖ Exporter dans Epacad puis enregistrer le fichier au format INP.

Le fichier crée est utilisable et peut alors être visionné sur le logiciel EPANET. L'obtention de ce fichier marque la fin de la construction du modèle figure 11 avec lequel il est possible de faire des simulations sur le réseau.

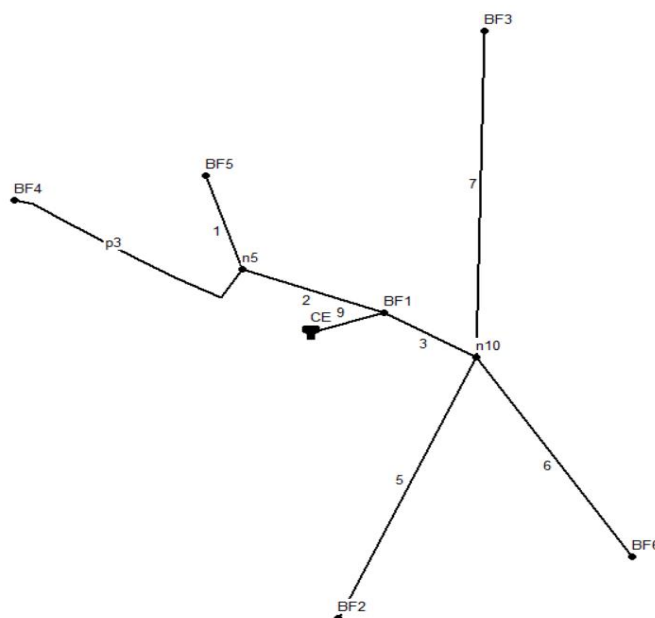


Figure 11 : Tracé du réseau sur EPANET

3.2.4 Méthode de simulation de la qualité de l'eau et d'analyse

La modélisation de la qualité de l'eau est une extension directe de la modélisation des réseaux hydrauliques. Pour simuler la qualité, plusieurs étapes ont été procédées comme suit :

Etapes pour la simulation du réseau hydraulique :

- ❖ Aller dans EPANET, puis dans affichage et importer un réseau et choisir le réseau ;
- ❖ Enregistrer sous format texte : Sauvegarder la configuration du réseau dans un fichier au format texte ;
- ❖ Entrer les propriétés des éléments du réseau : Renseigner les caractéristiques techniques des différents composants du réseau (conduites, réservoirs, nœuds, etc.) ;
- ❖ Définir le fonctionnement du système : Décrire les règles et conditions de fonctionnement du réseau de distribution ;
- ❖ Choisir les options de simulation : Sélectionner les paramètres de simulation pour l'analyse hydraulique ;
- ❖ Exécuter une simulation : Lancer la simulation pour une analyse hydraulique ;

- ❖ Consulter les résultats de simulation : Visualiser et analyser les résultats obtenus suite à la simulation du réseau.

Etapes pour la simulation de la qualité :

Ici il y a deux options à paramétrer *figure 12* : Option-Qualité qui détermine le type d'analyse de la qualité de l'eau à effectuer le transport de contaminant dans le réseau et Option-Réactions qui détermine le type de la réaction de la simulation de la qualité de l'eau.

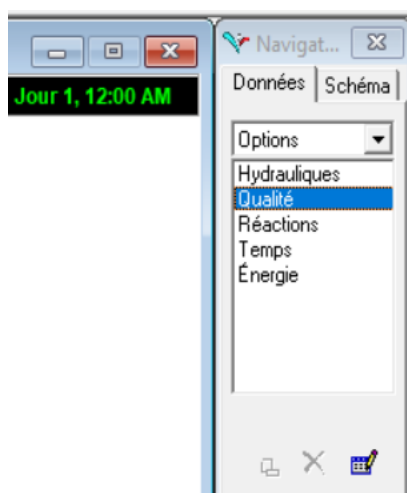


Figure 12 : Paramétrage des options

- ❖ Sélectionner Option-Qualité dans le navigateur des Données et ouvrir l'éditeur des propriétés correspondant. Dans le champ Paramètre taper le mot Chlore ;
- ❖ Sur Option-Réactions dans le Navigateur des Données pour le Coeff. Global de React dans la Masse introduire une valeur

Propriété	Valeur
Paramètre	Chlore
Unités de Masse	mg/l
Diffusivité Relative	1
Noeud de Dépistage	
Tolérance de Qualité	0,01

Figure 13 : Paramétrage de la qualité

Propriété	Valeur
Ordre Réaction Masse	1
Ordre Réaction Parois	Un
Coeff. Global Réact. dans la Masse	-0,3
Coeff. Global Réact. aux Parois	0
Concentration Limite	0
Coeff. Correlation Parois	0

Figure 14 : Paramétrage des réactions

Hypothèse de modélisation du chlore

- ❖ Quantité du chlore dans le réservoir : 0,5 mg/l
- ❖ Temps de simulation : 12 heures
- ❖ Ordre de réaction de masse : 1

- ❖ Coefficient global de réaction dans la masse : -0,3
- ❖ Modèle de mélange : modèle parfait
- ❖ Quantité initiale de l'eau : 0,5 mg/l
- ❖ Type de source : concentration en entrée

3.2.5 Conception de l'application mobile et son fonctionnement

Pour concevoir notre application mobile, plusieurs étapes ont été suivies comme suit :

Créer un site web :

- ❖ Enregistrer le fichier .inp d'EPANET qui sera simulé dans l'application ;
- ❖ Utiliser le langage de programmation Python, le Framework Flask pour pouvoir vite coder ;
- ❖ Utiliser la bibliothèque WNTR pour lire le fichier ;
- ❖ Utiliser la base de données SQLite avec SQLAlchemy ;
- ❖ D'autres outils comme bibliothèque math pour les calculs mathématiques liés aux simulations.

Pour l'application nous avons utilisé Flutter où nous avons commencé d'abord par :

- ❖ Les vues qui se présentent en trois pages en application (page d'accueil, page de visualisation des données simulées, Page de gestion des alertes et notifications) ;
- ❖ Ensuite préparer la partie logistique et la partie pour la consommation des API ;
- ❖ Afficher l'image des statistiques, voir les données reçues et pouvoir lancer les notifications.

Ce chapitre a présenté les outils et méthodes utilisés pour surveiller la concentration du chlore résiduel dans le réseau de distribution. L'intégration d'EPANET pour les simulations et le développement d'une application mobile constitue une approche innovante et efficace, assurant des résultats fiables et adaptés aux besoins de gestion du réseau.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

Les différents résultats ont été présentés dans ce chapitre.

4.1 Résultats des calculs AEP

- ❖ Calcul de la population actuelle et à l'horizon :

Le tableau 5 présente les différents résultats. La population d'Alinka qui était de 3000 habitants en 2022 est estimée à 3140 en 2024, et 5672 à l'horizon 2050. On note une croissance rapide de la population. Le besoin à l'horizon 2050 est presque le double de la demande actuelle (2024)

Tableau 5: Calcul de la population actuelle et à l'horizon 2050

Année	2022	2024	2030	2035	2040	2050
Population estimée	3000	3140	3599	4032	4518	5672

- ❖ Calcul de la consommation domestique, non domestique et consommation journalière moyenne

Tableau 6: Calcul de la consommation journalière moyenne

c_s	P_{BF}	Q_{dom} [m3/jr]	Q_{non_dom} [m3/jr]	Q_{jm} [m3/jr]
24	6	72	7,2	79,2

- ❖ Calcul du débit dimensionnement du réseau de distribution

Tableau 7: Consommation jour de pointe

Q_{jm} [m3/jr]	C_{ps}	C_{pj}	C_{ph}	Q_{jp} [m3/jr]	Rendement du réseau	Q_{ph} [m3/h]	Q_{hm} [m3/h]	Q_{BF} [m3/h]	Q_{prod} [m3/h]
79,2	1,7	1,1	2,88	148,104	0,85	41,76	3,3	6,96	12,1

- ❖ Caractéristiques du réservoir

Tableau 8: Caractéristiques du réservoir

Volume utile	[m3]	100
Hauteur utile	[m]	6,5
Diamètre utile	[m]	4,5

4.2 Résultats et interprétations des simulations

Introduction des données appropriées aux nœuds, aux tronçons et au réservoir :

Propriété	Valeur
ID Nœud	BF3
Coordonnée X	299942.45
Coordonnée Y	695149.89
Description	
Genre	
*Altitude	22
Demande de Base	1.93
Coube Modul. Demande	
Catégories de Demande	1
Coef. de l'Émetteur	
Qualité Initiale	
Qualité de Source	
Demande Actuelle	Sans Valeur
Charge	Sans Valeur

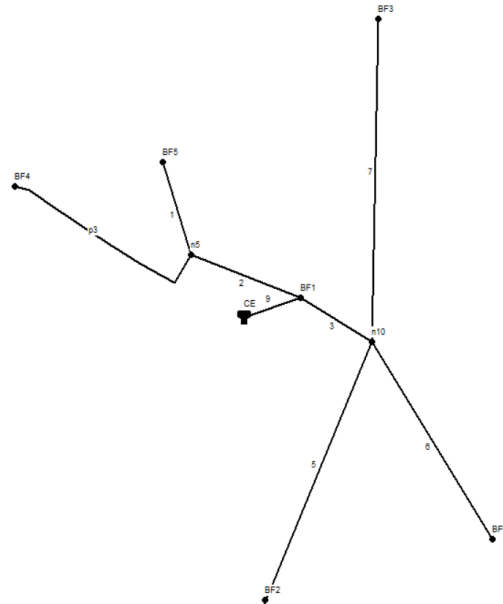


Figure 15 : Exemple de saisie de données pour les nœuds

Propriété	Valeur
ID Tuyau	7
*Nœud Initial	BF3
*Nœud Final	n10
Description	
Genre	
*Longueur	791.6893
*Diamètre	75
*Rugosité	0.1
Coef. Pertes Singul.	0
État Initial	Ouvert
Coef.Réact. dans la Masse	
Coef.Réact. aux Parois	
Débit	Sans Valeur
Vitesse	Sans Valeur

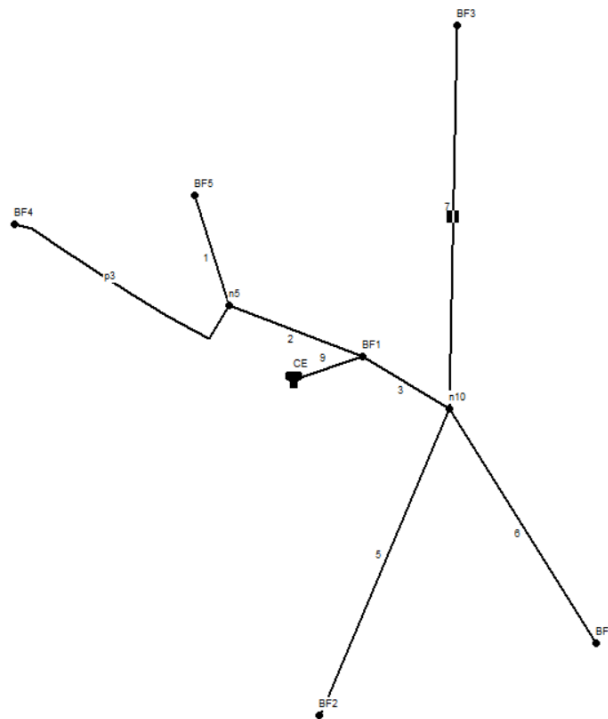


Figure 16 : Exemple de saisie de données pour les conduites

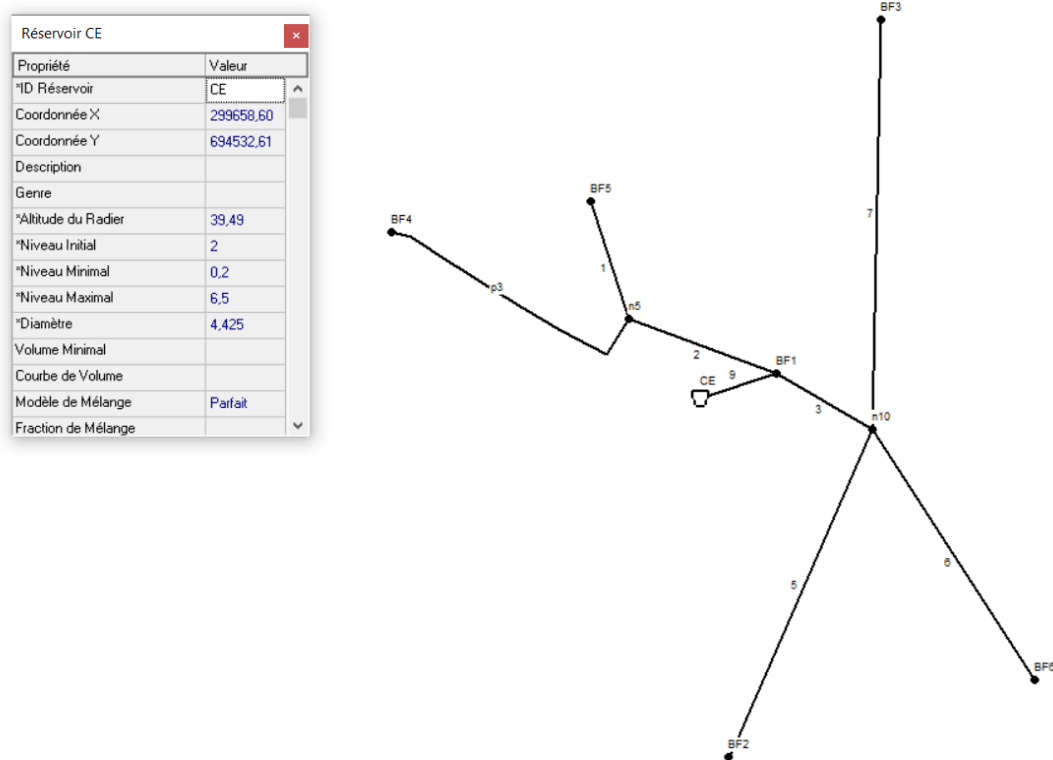


Figure 17 : Exemple de saisie de données pour le réservoir

Après avoir introduit toutes les données appropriées, l'étape suivante est la validation du modèle hydraulique. La simulation a révélé réussie comme le montre la *figure 18* ci-dessous.

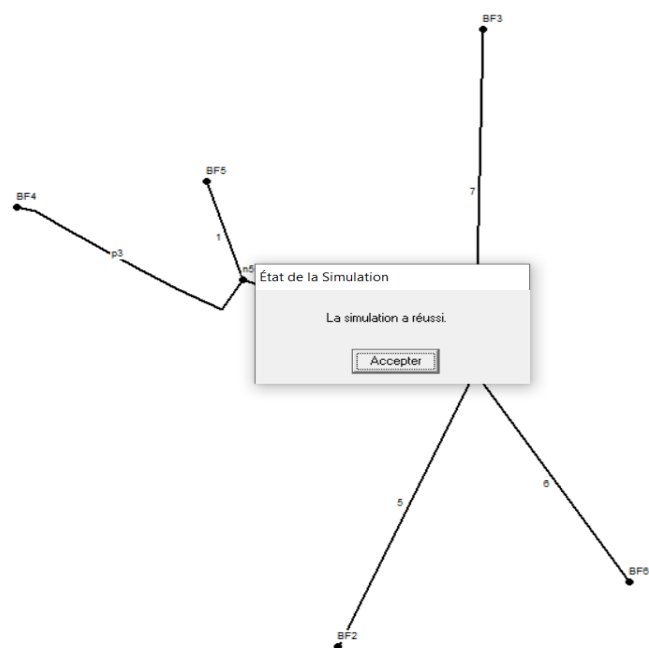


Figure 18 : Simulation réussie

Après l'étape suivante était de renseigner les options de la qualité :

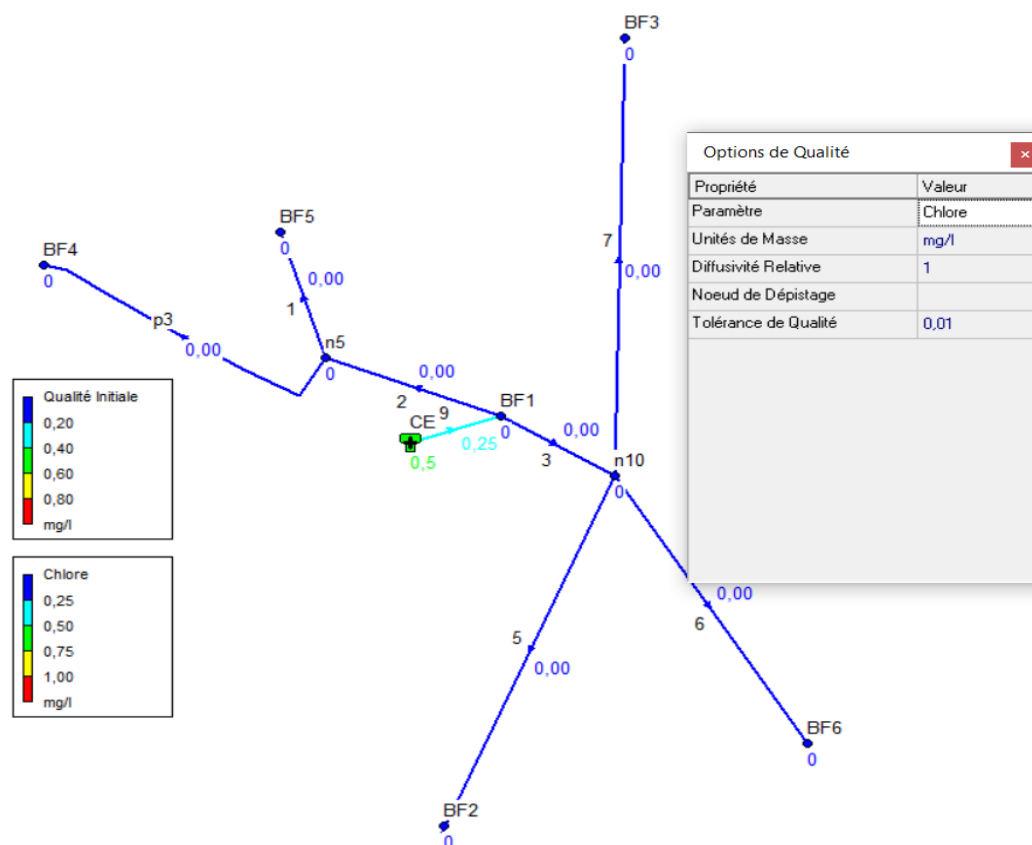


Figure 19 : Exemple de configuration de la qualité

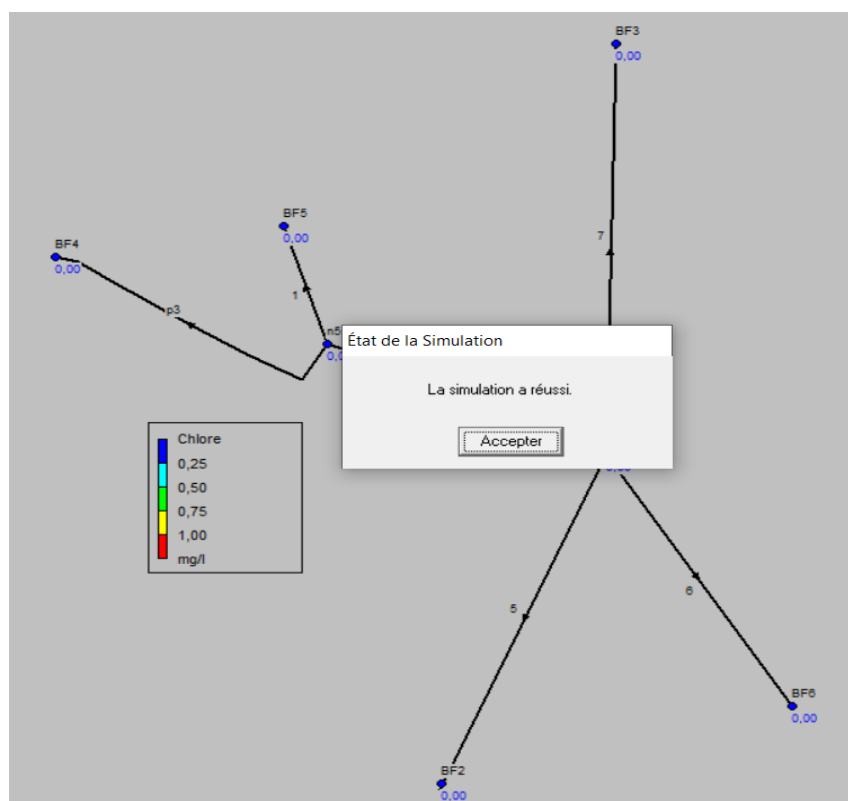


Figure 20 : Simulation de la qualité réussie

La figure 20 ci-dessus montre la simulation réussie de la qualité. Dans le cadran l'échelle avec des couleurs correspond à la concentration de chlore résiduel dans l'eau potable exprimée en mg/l :

- De 0 – 0,25 mg/l indique une concentration très faible du chlore résiduel
- De 0,25 – 0,5 mg/l indique une concentration modérée
- De 0,5 – 0,75 mg/l indique la concentration adéquate de chlore pour désinfecter efficacement l'eau tout en restant dans les normes pour la consommation humaine
- De 0,75 – 1 mg/l indique une concentration relativement élevée mais reste acceptable selon les normes de l'OMS.

4.2.1 Résultats des simulations de courtes durées

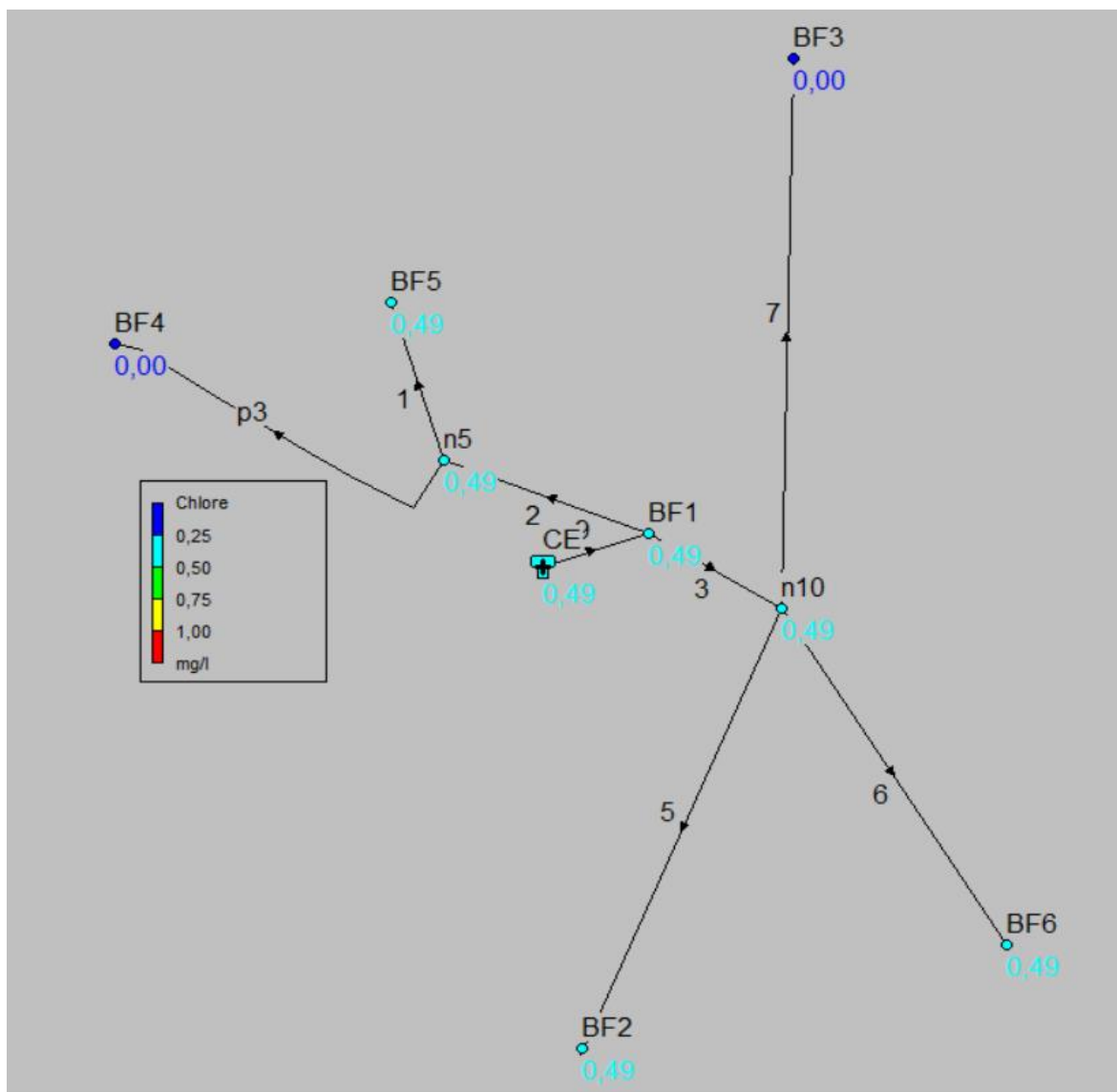


Figure 21 : Concentration en chlore des nœuds de consommation

La figure 21 ci-dessus montre la simulation de courtes durées qui indique que la concentration aux nœuds de consommation est bonne et respecte les normes.

Tableau 9: Données simulées au niveau des nœuds

ID Nœud	Altitude m	Demande Base LPS	Qualité Initiale mg/l	Demande LPS	Charge m	Pression m	Chlore mg/l
Noeud BF5	18	1,93	0	0,48	39,14	21,14	0,49
Noeud BF6	18	1,93	0	0,48	39,04	21,04	0,49
Noeud BF2	18	1,93	0	0,48	39,03	21,03	0,49
Noeud n5	18	1,93	0	0,48	39,15	21,15	0,49
Noeud BF4	18	1,93	0	0,48	39,10	21,10	0,00
Noeud BF3	22	1,93	0	0,48	38,93	16,93	0,00
Noeud n10	18	0	0	0,00	39,15	21,15	0,49
Noeud BF1	20	1,93	0	0,48	39,24	19,24	0,49
Réservoir CE	39,49	Sans Valeur	0,5	-3,38	39,91	0,42	0,49

Le taux de chlore libre acceptable est compris entre 0,5 et 1 mg/l (FAO, 2015).

La concentration du chlore résiduel est homogène à 0,49 mg/l dans la majorité des nœuds à savoir les nœuds (BF5, BF6, BF2, n5, n10, BF1). Cela indique donc une bonne distribution du chlore dans ces nœuds conforme aux normes de l'OMS.

Les nœuds BF3 et BF4 affichent une concentration nulle (0 mg/l) ceci juste pour une heure de temps mais après ça, le chlore vient normalement dans tout le réseau.

Dans le cas contraire on pourrait dire que cela peut indiquer un problème comme une stagnation de l'eau, une dégradation rapide du chlore potentiellement à cause d'une forte demande en agents oxydants dans l'eau.

Recommandations des zones problématiques ou critiques (BF3 et BF4)

Ces nœuds montrent une absence de chlore, ce qui peut poser un problème sanitaire aux consommateurs. Il faudra donc :

- ❖ Vérifier les conditions hydrauliques dans ces zones (pression, débit, temps de séjour)
- ❖ Analyser si le réseau nécessite une relocalisation des points d'injection de chlore pour améliorer la couverture.

Conclusion : La concentration de chlore est satisfaisante dans la majorité des nœuds, cela reflète une distribution efficace dans la majeure partie du réseau

4.2.2 Résultats des simulations de longues durées

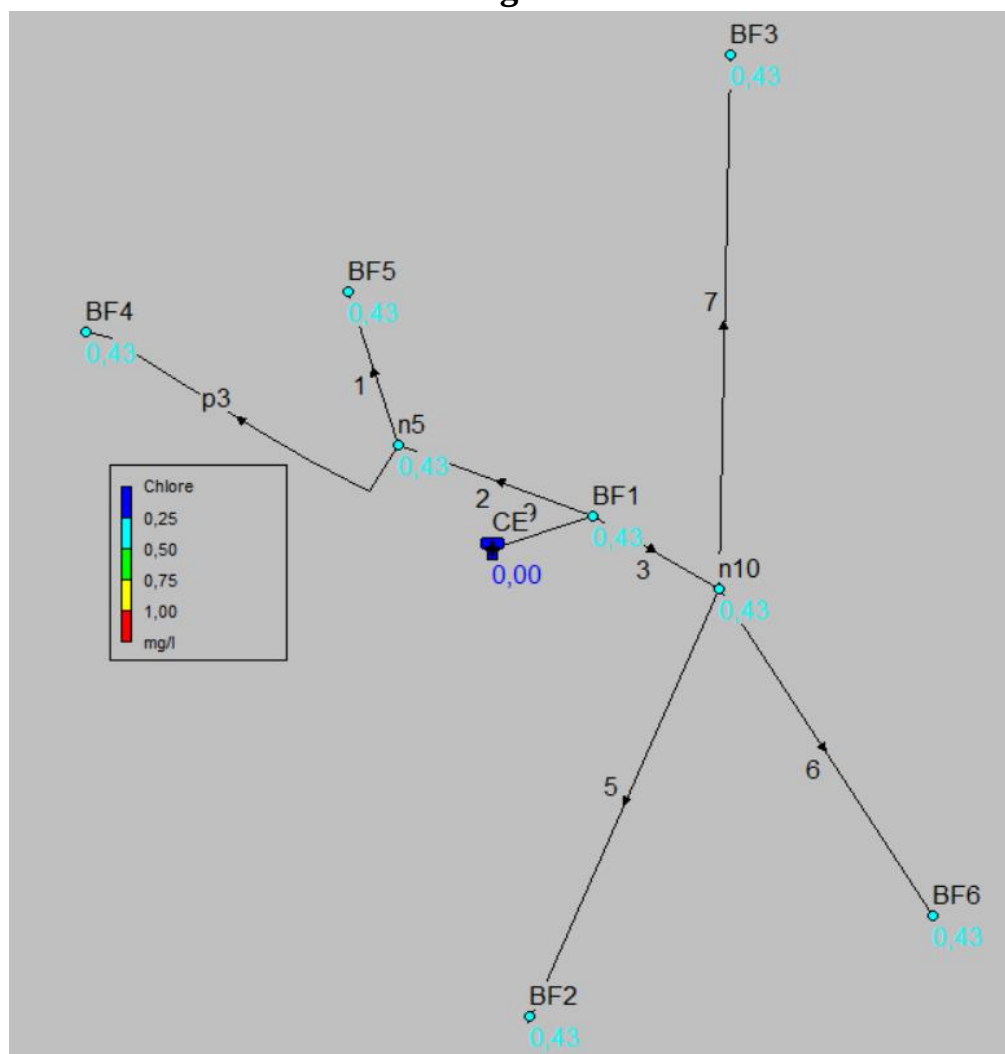


Figure 22 : Exemple de simulation de longues durées

- ❖ Il est à notifier que lorsqu'on simule au fil du temps à partir de 2h et plus, on remarque cette fois-ci que les nœuds dans lesquels la concentration était de 0 mg/l passent à une concentration supérieure à zéro. Cela pourrait être dû à un temps de réponse du réseau pour atteindre ces nœuds à cause de la dynamique hydraulique ou d'un temps de séjour élevé.

Recommandation : Il faudra vérifier si ces zones sont éloignées ou ont de faibles pressions initiales.

- ❖ Il est à noter aussi que ces concentrations varient en diminuant dans tous les nœuds. Cela pourrait être dû à la dégradation du chlore c'est-à-dire que le chlore se décompose chimiquement en fonction du temps, de la température et des interactions avec les matières organiques. Une augmentation de la consommation d'eau peut entraîner une dilution du chlore disponible.

Comme recommandation : Il faudra simuler sur des périodes plus longues, étudier la durée de maintien du chlore résiduel pour ajuster les quantités injectées.

Tableau 10: Données simulées au fil du temps

ID Arc	Longueur m	Diamètre mm	Rugosité mm	Coeff. Masse	Débit LPS	Vitesse m/s	Pert.Charge Unit. m/km	Facteur Friction	Vitesse Réact. mg/l/jour	Chlore mg/l
Tuyau p3	463,7	90	0,1	-0,3	0,48	0,08	0,12	0,036	0,11	0,42
Tuyau 1	100	90	0,1	-0,3	-0,48	0,08	0,12	0,036	0,15	0,49
Tuyau 2	100	90	0,1	-0,3	-0,96	0,15	0,40	0,031	0,15	0,49
Tuyau 3	100	90	0,1	-0,3	1,93	0,30	1,40	0,027	0,15	0,49
Tuyau 5	440,355	75	0,1	-0,3	0,48	0,11	0,28	0,035	0,15	0,49
Tuyau 6	406,355	75	0,1	-0,3	0,48	0,11	0,28	0,035	0,15	0,49
Tuyau 7	791,6893	75	0,1	-0,3	-0,48	0,11	0,28	0,035	0,10	0,36
Tuyau 9	461,67	110	0,1	-0,3	3,38	0,36	1,46	0,025	0,15	0,49

Tableau 11: Exemple de variation de la concentration de chlore au fil du temps à un seul nœud

Instant en heures	Longueur m	Diamètre mm	Rugosité mm	Coef. Masse	Débit LPS	Vitesse m/s	Vitesse Réact. mg/l/jour	Chlore mg/l	État
0:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,00	0,00	Ouvert
1:00	100	90	0,1	-0,3	1,45	0,23	0,15	0,50	Ouvert
2:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,15	0,49	Ouvert
3:00	100	90	0,1	-0,3	3,47	0,55	0,15	0,48	Ouvert
4:00	100	90	0,1	-0,3	2,32	0,36	0,14	0,48	Ouvert
5:00	100	90	0,1	-0,3	2,32	0,36	0,14	0,48	Ouvert
6:00	100	90	0,1	-0,3	1,33	0,21	0,14	0,47	Ouvert
7:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,14	0,46	Ouvert
8:00	100	90	0,1	-0,3	3,24	0,51	0,14	0,46	Ouvert
9:00	100	90	0,1	-0,3	4,63	0,73	0,14	0,45	Ouvert
10:00	100	90	0,1	-0,3	1,16	0,18	0,13	0,45	Ouvert
11:00	100	90	0,1	-0,3	3,94	0,62	0,13	0,44	Ouvert
12:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,13	0,44	Ouvert
13:00	100	90	0,1	-0,3	1,45	0,23	0,13	0,43	Ouvert
14:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,13	0,42	Ouvert
15:00	100	90	0,1	-0,3	3,47	0,55	0,13	0,42	Ouvert
16:00	100	90	0,1	-0,3	2,32	0,36	0,12	0,41	Ouvert
17:00	100	90	0,1	-0,3	2,32	0,36	0,12	0,41	Ouvert
18:00	100	90	0,1	-0,3	1,33	0,21	0,12	0,40	Ouvert
19:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,12	0,40	Ouvert
20:00	100	90	0,1	-0,3	3,24	0,51	0,12	0,39	Ouvert
21:00	100	90	0,1	-0,3	4,63	0,73	0,12	0,39	Ouvert
22:00	100	90	0,1	-0,3	1,16	0,18	0,12	0,38	Ouvert
23:00	100	90	0,1	-0,3	3,94	0,62	0,11	0,38	Ouvert
24:00	100	90	0,1	-0,3	2,89	0,46	0,11	0,38	Ouvert

Le tableau 11 présente la variation de la concentration en chlore ; nous constatons donc qu'au fur et à mesure que le temps passe le niveau de la concentration de chlore baisse.

4.3 Présentation de l'application

4.3.1 Description et utilité de l'application

Notre application est conçue pour surveiller la qualité de l'eau potable dans le réseau de distribution d'eau du village d'Alinka. Elle utilise le fichier .inp simulé par EPANET et la bibliothèque WNTR de Python pour visualiser les données. Elle permet de suivre en temps réel les paramètres notamment les résidus de chlore et d'envoyer des alertes en cas de non-conformité aux normes de l'OMS et aide à prendre des décisions rapides pour gérer efficacement le réseau. Avec une interface intuitive développée sous Flutter et une base de données SQLite, elle est un outil pratique pour améliorer la qualité et la sécurité de l'eau potable.

Objectif final de l'application : C'est d'avoir les simulations d'EPANET dans une application Flutter, voir la pression, le débit, la qualité de l'eau, les paramètres de chaque nœud, les statiques, et aussi les alertes lorsque les valeurs sont en-dessous ou au-dessus du seuil normal.

Fonctionnalités :

- ❖ Surveillance en temps réel : l'application permet de suivre en temps réel des paramètres essentiels
- ❖ Notifications automatiques : on reçoit des alertes lorsque les valeurs ne sont pas en conformité aux normes de l'OMS
- ❖ Génération des statistiques : présente les graphiques basés sur l'historique des données.

La *figure 23* présente l'interface web permettant de sélectionner un fichier inp d'EPANET pour procéder à une analyse hydraulique.

Après le chargement du fichier .inp d'Epanet, nous passons à la conception proprement dite de l'application.

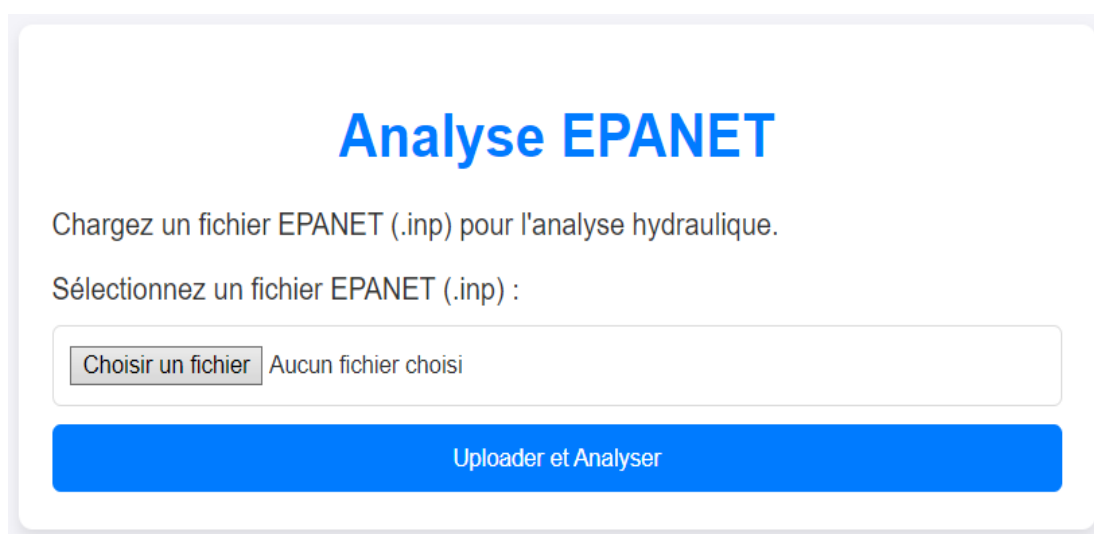


Figure 23 : Téléverser: URL: <https://winds.alwaysdata.net/views/v>

4.3.2 Diagramme de cas d'utilisation

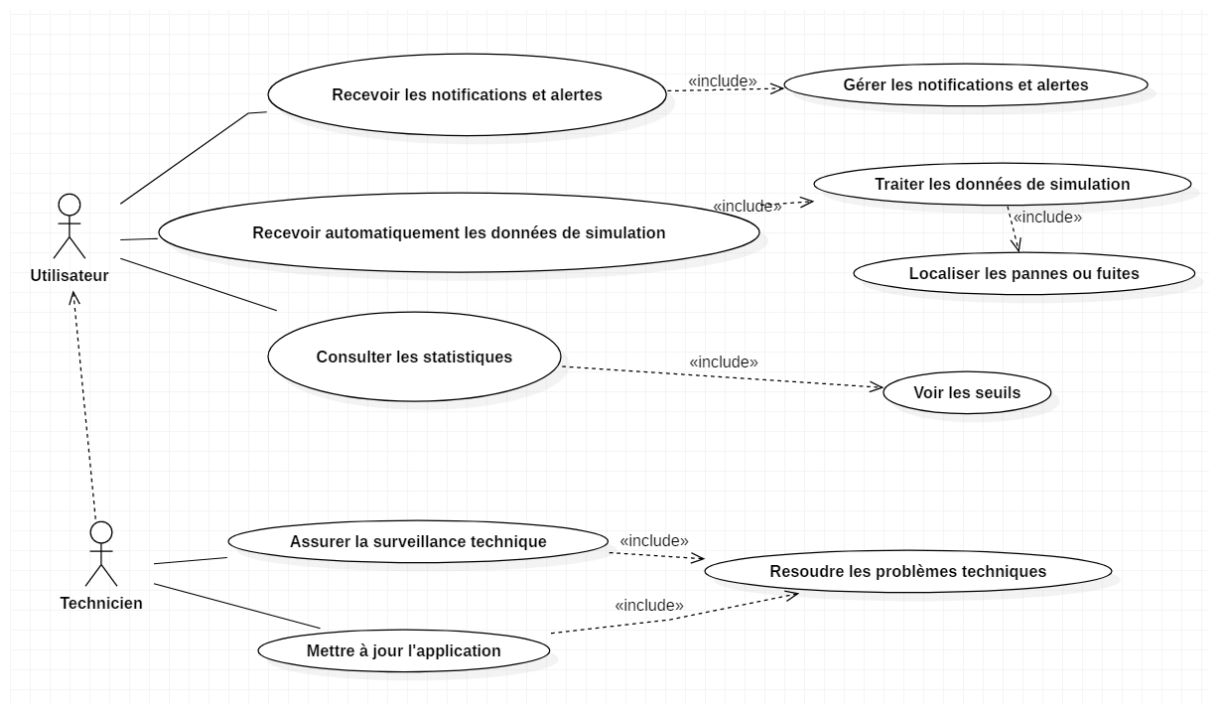


Figure 24 : Diagramme de cas d'utilisation

4.3.3 Fonctionnement

Une application mobile est un logiciel conçu pour être utilisé sur des appareils mobiles tels que les smartphones ou les tablettes. Ainsi, comme l'indique la *figure 25* à l'exécution de notre application sur le smartphone de l'utilisateur, une page de chargement se présente comme l'indique *figure 26* et directement on accède à la page de connexion *figure 27* qui nous demande un accès par le mail et le mot de passe. Après le remplissage de ses informations, on accède directement à la page d'accueil qui nous présente brièvement les fonctionnalités de l'application à savoir la surveillance des paramètres en temps réel du réseau comme la *figure 28* ci-dessous et de là on a la possibilité d'accéder à toutes les autres fonctionnalités de l'application.



Figure 25 : Logo de l'application



Figure 26 : Page de chargement de l'Application

La *figure 27* nous présente la page de connexion qui demande les accès nécessaires pour pouvoir entrer dans l'application. Ces accès sont l'adresse mail ainsi que le mot de passe.

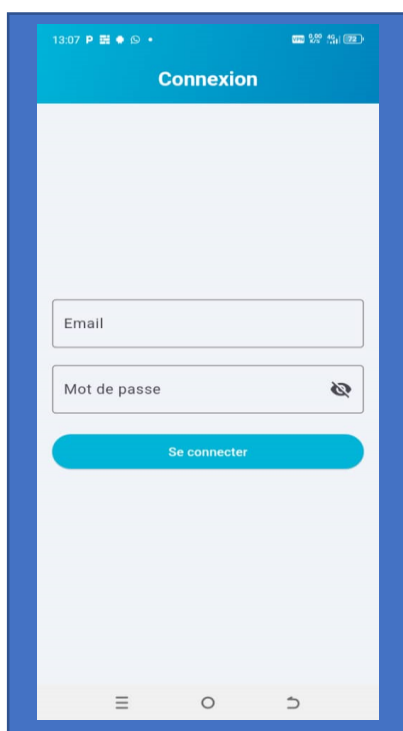


Figure 27 : Interface de connexion

La *figure 28* présente la page d'accueil qui recense toutes les demandes, les pressions, la qualité, les débits, la vitesse et la hauteur des nœuds, ceci en temps réel. Ces données sont simulées ici sur 24 heures et changent toutes les 10 secondes.

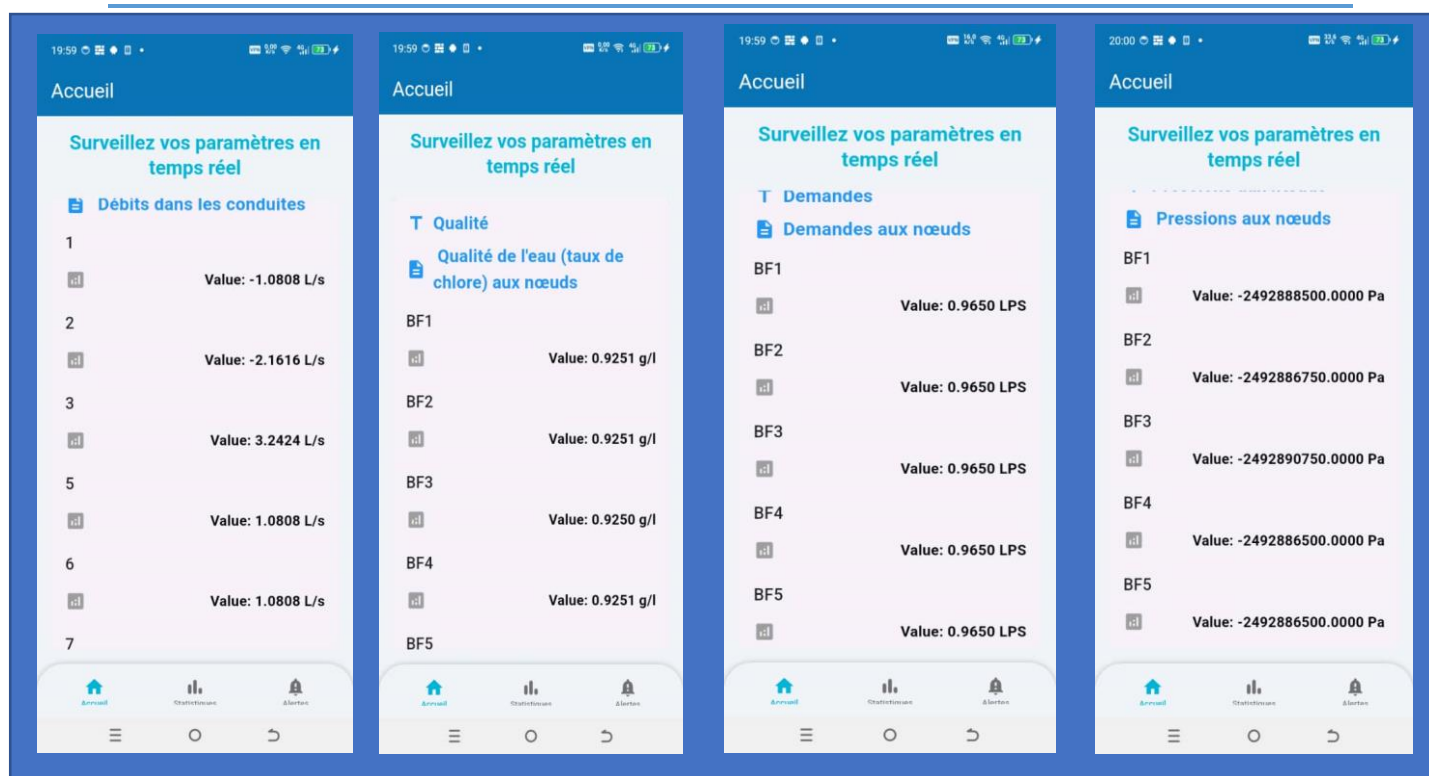


Figure 28 : Interface présentant la page d'accueil des paramètres simulés

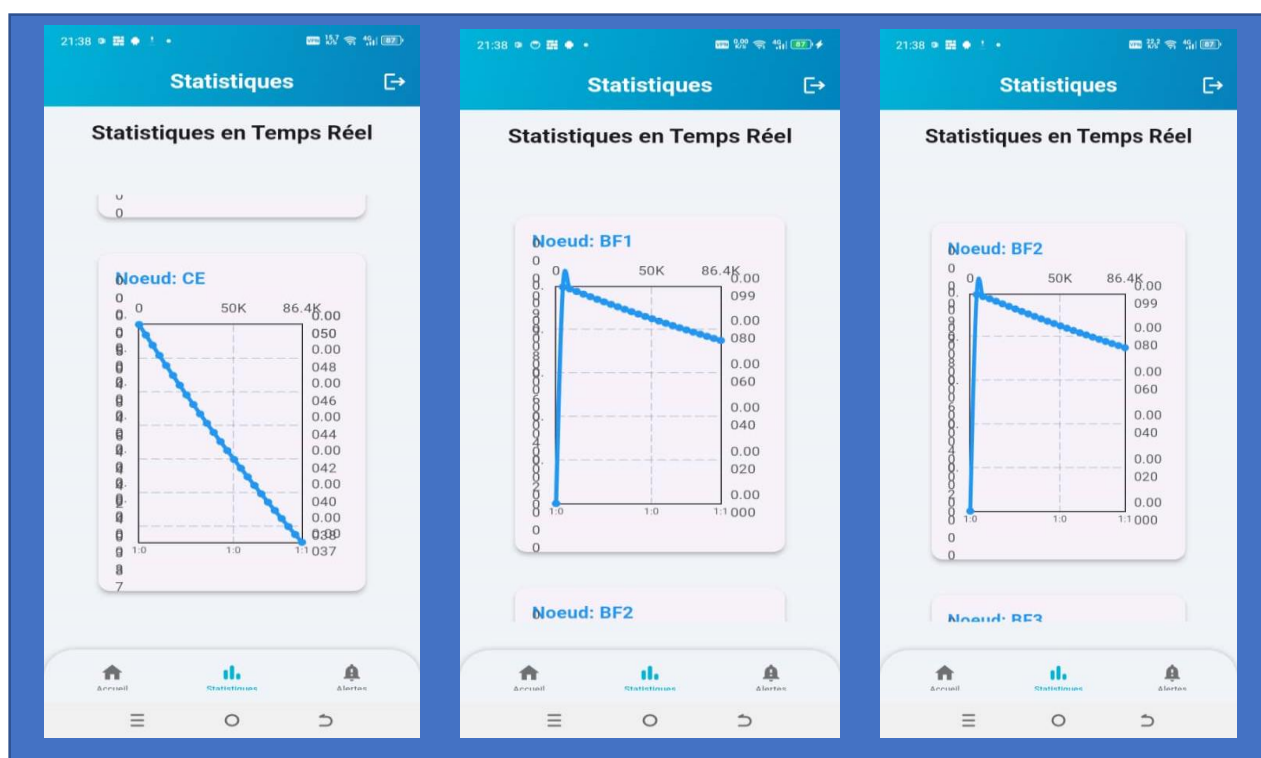


Figure 29 : Interface des statistiques

La figure 29 ci-dessus présente les interfaces graphiques montrant la variation de la distribution de chlore en fonction du temps au niveau de chaque nœud du réseau. Au nœud CE une diminution constante de la concentration du chlore résiduel se fait remarquer. Donc

cela indique la perte progressive de chlore dans le temps. Aux nœuds BF1 et BF2 une chute brutale de la concentration de chlore est enregistrée au début suivie d'une diminution plus lente jusqu'à une stabilisation.

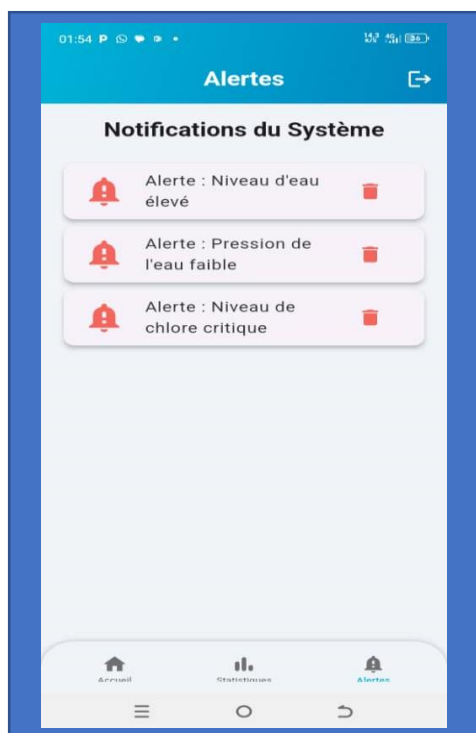


Figure 31 : Interface de la page des alertes

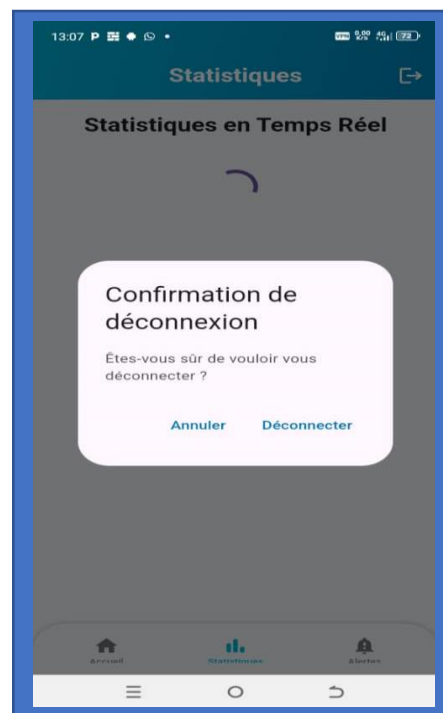


Figure 30 : Interface de déconnexion

La figure 30 ci-dessus présente la page des alertes montrant les différentes notifications reçues ainsi que leur gestion. Elle informe aux utilisateurs des situations critiques ou des anomalies dans le réseau. Une fois que l'utilisateur reçoit ces alertes, il peut les gérer en supprimant après leur consultation ou leur traitement.

La figure 31 ci-dessus présente l'interface de la déconnexion. Le message « êtes-vous sûr de vouloir vous connecter » permet d'éviter une déconnexion accidentelle.

4.4 Automatisation du système

Les capteurs vont être installés aux différents endroits du réseau de distribution pour mesurer les différents paramètres qui seront envoyés vers le serveur qui les transmet ensuite au site web et à l'application mobile qui collecte toutes les données et les affiche sous forme de tableau de bord.

et envoi des alertes en cas d'anomalies. L'utilisateur reçoit les alertes et prend les mesures correctives, il peut ajuster les niveaux de chlore, réparer les fuites confer figure 30.

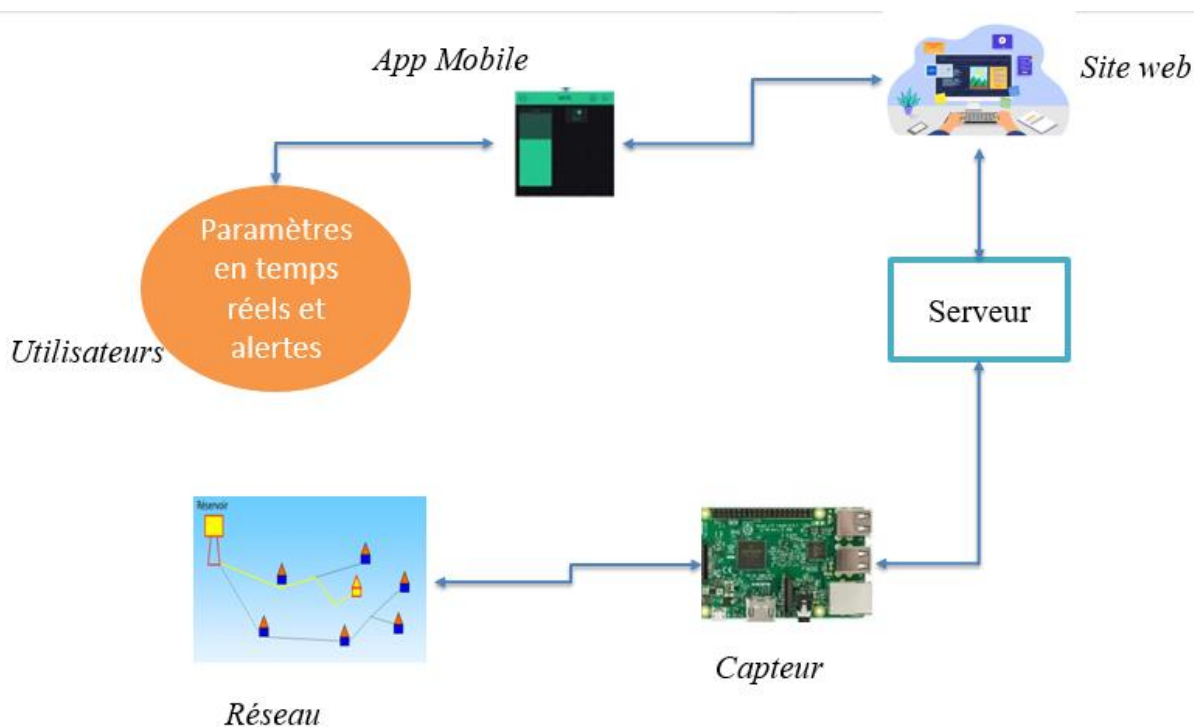


Figure 32 : Schéma explicatif d'automatisation du système

Organigramme du suivi du chlore résiduel en temps réel

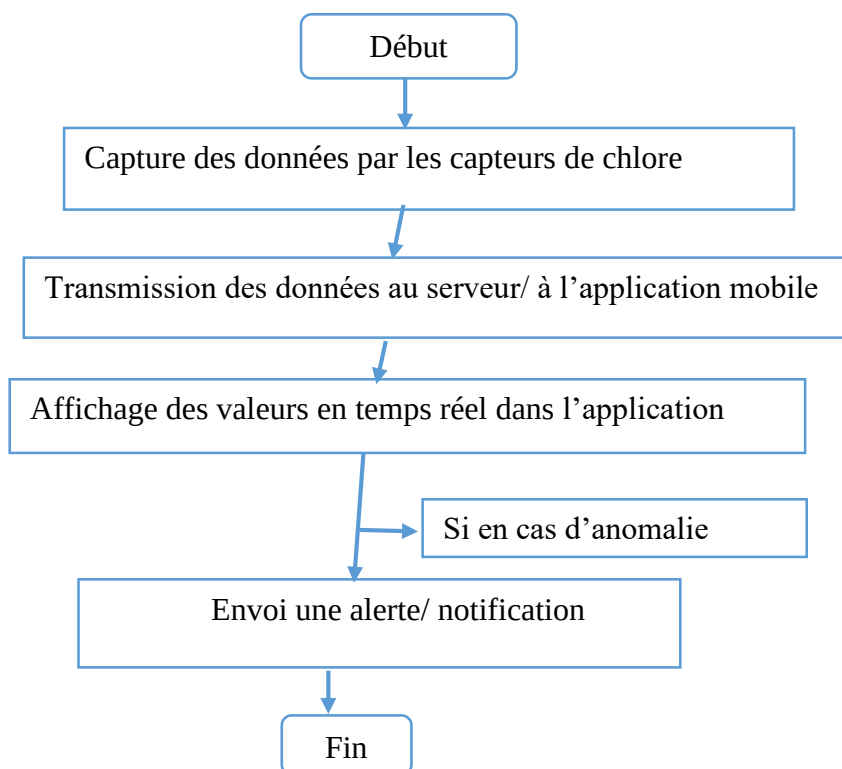


Figure 33 : Organigramme du suivi du chlore résiduel en temps

En conclusion, les résultats explorés dans ce chapitre confirment l'efficacité des méthodes adoptées pour analyser et gérer le réseau de distribution d'eau potable d'Alinka, tout en mettant en valeur le rôle central de l'application mobile développée.

Celle-ci a permis un suivi précis en temps réel des paramètres critiques tels que les pressions, les débits et les concentrations résiduelles de chlore, contribuant à identifier les zones critiques et à garantir la conformité aux normes. Les discussions ont souligné les points forts du réseau et les améliorations nécessaires.

Ces conclusions valident l'approche proposée et illustrent l'apport de la technologie numérique pour une gestion optimisée et durable.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La mise en place d'un système de surveillance en temps réel de la qualité de l'eau constitue une avancée cruciale pour garantir la sécurité et la santé publique.

Cette étude a réussi à développer une application mobile pour la surveillance de la concentration du désinfectant résiduel aux différents nœuds du réseau d'approvisionnement en eau potable d'Alinka. La première étape a consisté en une modélisation du réseau de distribution de l'eau à l'aide d'EPANET, qui a permis de faire une simulation de la qualité de l'eau qui est le chlore résiduel. La deuxième étape s'est concentré sur le développement de l'interface de visualisation des outputs d'EPANET à savoir la page de chargement, de connexion, d'accueil, des statistiques, d'alerte et de déconnexion. La troisième étape a présenté un protocole d'alerte du réseau en cas d'anomalies, ceci pour automatiser le système.

Bien que ce projet ait enregistré des résultats satisfaisants, le système n'a pas été automatisé en intégrant des alertes en cas d'anomalies en raison de l'absence de connexion des capteurs IoT. Ce projet aurait bien voulu aller jusqu'à la réalisation d'un prototype de communication mais faute du temps limité et du manque de matériel adapté cela n'a pas été possible.

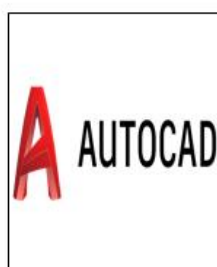
Malgré l'atteinte de plusieurs objectifs, certaines limites ouvrent la voie à de futures améliorations dont :

- ❖ La connexion à des capteurs IoT pour un suivi en temps réel encore plus précis en intégrant des alertes en cas d'anomalies.
- ❖ La mise en place d'un prototype fonctionnel permettant de tester le système.
- ❖ L'intégration de modules d'analyse prédictive pour anticiper les anomalies.
- ❖ L'intégration d'algorithmes d'optimisation ou autres paramètres de qualité.
- ❖ L'élargissement des fonctionnalités pour inclure des aspects tels que la gestion des pertes ou la maintenance prédictive.

Annexe : Langages et Logiciels de programmation



Flutter



Références bibliographiques

- [1] : Ashbolt, N. J. (2004). Microbial Contamination of Drinking Water and Disease Outcomes in Developing Regions. *Environmental Microbiology*, 6(3), 316-326.
- [2]: Bartram, J., & al. (2005). *Water for Life: Making it Happen*. Geneva: World Health Organization (WHO).
- [3]: Benblidia, M., & Thivet, G. (2010). Gestion des ressources en eau : Les limites d'une politique de l'offre.
- [4]: Blindu, I. (2004). Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques [Phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne]. <https://theses.hal.science/tel-00779032>
- [5]: Bonnin, J. (1982). Aide-mémoire d'hydraulique urbaine. Aide-mémoire d'hydraulique urbaine, 42.
- [6]: Boulos, P. F., Lansey, K. E., & Karney, B. W. (2006). Real-Time Water Quality anagement Using Mobile Technologies. *Water Resources Management*, 20(6), 897-913.
- [7]: Dillon, P., Fernández Escalante, E., Megdal, S. B., & Massmann, G. (2020). Managed Aquifer Recharge for Water Resilience. *Water*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/w12071846>
- [8]: Diop-Seck, N. A. (2022). Etude analytique de pesticides utilisés dans la zone des Niayes par la méthode de fluorescence photo induite et développement d'un système automatique d'alerte [Phdthesis, Université de Bretagne occidentale - Brest ; Université Alioune Diop (Bambey)]. <https://theses.hal.science/tel-04146752>
- [9]: Djamah, M., Aoudjit, M., Hadaoui, M., & Balkadi, M. (2016). Conception et réalisation d'une application mobile multiplateformes pour le transport routier de personnes et de marchandises en temps réel.
- [10]: Dupond, A. (1981). *Hydraulique urbaine Tome2*—Editions Eyrolles. France.

- [11]: Gnamba, F. M., Kpan, O. J. G., N', W., & Solange, Y. M. (2020). Modélisation hydraulique du réseau d'adduction d'eau potable (AEP) de la ville de Korhogo [Hydraulic modeling of drinking water network from the city of Korhogo]. 52(1).
- [12]: Khatri, K. B., & Vairavamoorthy, K. (2012). Water Demand Forecasting for the City of the Future against the Uncertainties and the Global Change Pressures : Case of Birmingham. 1-15. [https://doi.org/10.1061/41036\(342\)523](https://doi.org/10.1061/41036(342)523)
- [13]: Laborde, P. J. P. (2009). ELEMENTS D'HYDROLOGIE DE SURFACE.
- [14]: Marsily, G. de, & Besbes, M. (2017). Les eaux souterraines. Annales des Mines - Responsabilité & environnement, 86(2), 25-30. <https://doi.org/10.3917/re1.086.0025>
- [15]: Mokhbat, A. (2024). Réalisation et Implémentation d'un Système Avancé pour le monitoring Intelligent de la Qualité de l'Eau pour application industrielle. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/29905>
- [16]: Nations Unies (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations
- [17]: Prüss-Ustün, A., & Corvalán, C. (2006). Preventing Disease Through Healthy Environments. Geneva: WHO.
- [18]: Yikpa, K., Madjigoto, R., Ndamé, P., & Prosper, M. N. T. (2019). Apport des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) dans la gestion et le suivi des réseaux d'Adduction d'Eau Potable (AEP) dans la ville de Lomé. Cas des réseaux des quartiers de Vakpossito et Dabarakondji.
- [19]: Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 Users Manual. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- [20]: UNICEF. (2019). State of the World's Children. UNICEF Publications, New York.
- [21]: WASHWatch (2020). Water, Sanitation and Hygiene in Togo. [Online Resource].
- [22]: World Health Organization (WHO). (2012). Water Safety Planning for Small Community Water Supplies. World Health Organization Press, Geneva.

[22]: F. Auclert, « Les applications smartphones les plus téléchargées de la décennie », Futura. <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/smartphone-applications-smartphones-plus-telechargees-decennie-78883>.

[23] BOITMOBILE, « Application mobile - Définitions Marketing ». <https://www.definitions-marketing.com/definition/Application-mobile>.