



UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT-GENIE-INFORMATIQUE

MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Pour l'obtention du :

DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION EN GENIE INFORMATIQUE
OPTION : TELECOMMUNICATIONS ET RESEAUX

SUJET :

Conception et réalisation d'un système de surveillance du niveau de la nappe Phréatique pour la prévention des inondations à Dakar

PERIODE ET LIEU DU STAGE : 12/10/2024- 26/06/2025 IFAN

Présenté et soutenu par :

Pape Diere Bodian

PROMOTION : 2025- DATE DE SOUTENANCE : 08 juillet 2025

MEMBRES DU JURY :

PRESIDENT	Pr Ibrahima Fall	Professeur titulaire du CAMES
RAPPORTEUR	Pr Mouhamadou Lamine Ba	Maître de conférences
ENCADRANT	Pr Idy Diop	Professeur titulaire du CAMES
MAITRE DE STAGE	Dr Nouhou Diaby	Chargé de Recherche titulaire
DIRECTEUR DE MEMOIRE	Pr Idy Diop	Professeur titulaire du CAMES



UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT-GENIE-INFORMATIQUE

MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Pour l'obtention du :

DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION EN GENIE INFORMATIQUE
OPTION : TELECOMMUNICATIONS ET RESEAUX

SUJET :

Conception et réalisation d'un système de surveillance du niveau de la nappe Phréatique pour la prévention des inondations à Dakar

PERIODE ET LIEU DU STAGE : 12/10/2024- 26/06/2025 IFAN

Présenté et soutenu par :

Pape Diere Bodian

PROMOTION : 2025- DATE DE SOUTENANCE : 08 juillet 2025

MEMBRES DU JURY :

PRESIDENT	Pr Ibrahima Fall	Professeur titulaire du CAMES
RAPPORTEUR	Pr Mouhamadou Lamine Ba	Maître de conférences
ENCADRANT	Pr Idy Diop	Professeur titulaire du CAMES
MAITRE DE STAGE	Dr Nouhou Diaby	Chargé de Recherche titulaire
DIRECTEUR DE MEMOIRE	Pr Idy Diop	Professeur titulaire du CAMES

Dédicace

Je dédie ce mémoire à Toute ma famille, mes amis et tous mes enseignants.

À ma mère Khady Gassama, femme forte pour son amour, son soutien et ses précieux conseils,

À ma tante Gnima Keita pour ses précieux conseils.

À Mon père Souleymane Bodian, qui a œuvré pour notre réussite, à travers ce travail aussi modeste soit-il, reçois l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude,

À mon oncle Ansou Cissokho et sa femme Ndeye Ndaw qui m'ont accueilli et soutenu tout au long de mes études supérieures, qu'Allah vous gratifie,

À mes soeurs Aida, Adjia, Bintou et Damba Sira.

À Mon frère Thierno

À ma nièce Lissa Diattara

À ma compagne Charlotte Dacosta qui m'a toujours soutenu et toujours cru en moi.

À mes cousins et cousines

À mes oncles et tantes.

À toute l'équipe du service infrastructure réseau(SIR) de la Senelec.

*À tous mes amis, camarades de classe, parrains, marraines, filleuls et mames. Une mention spéciale à **Abdoulaye Wade Mané, Djiby Loum, El hadj Demba Sarr, Ba Omar Sagna, Dallo Bangoura, Pa Mody Cissokho, Keba Cissokho, Ansou Ndao, Mame Abdoulaye Kairé, Abdoulaye Diao** pour tous ces beaux moments passés ensemble.*

À tous ces gens qui ont une fois cru en moi et m'ont accompagné dans mon cursus.

Remerciements

En premier lieu, je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la vie, la santé et la force afin de réaliser ce travail.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à mon encadrant Pr Idy DIOP pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée. J'ai profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. J'aimerais aussi le remercier pour l'autonomie qu'il m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie chaleureusement mon maître de stage Mr Nouhou Diaby pour les conseils, le soutien et le suivi.

Je remercie également Monsieur Mangoné Fall et Monsieur Moustapha Mbaye pour leurs conseils et leurs orientations.

Mention spéciale à Monsieur Damien Diop pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Merci également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie tout le corps professoral du département Génie Informatique.

Mes remerciements à toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à la réalisation du présent document.

Avant-propos

L'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) de Dakar est une école de formation professionnelle placée sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation du Sénégal. Fondée en mai 1964, elle est rattachée à l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar, tout en étant dotée de la personnalité juridique et d'une autonomie financière. L'ESP de Dakar est l'une des écoles d'ingénieurs les plus importantes du Sénégal et de l'Afrique de l'Ouest. Elle forme des techniciens supérieurs et des ingénieurs dans les domaines de la science, de la technique et de la gestion.

Histoire :

L'ESP, anciennement connue sous les noms de ENSUT (École Nationale Supérieure Universitaire de Technologie), IUT (Institut Universitaire de Technologie) et IP (Institut Polytechnique), a été créée par la loi n°94-78 du 24 novembre 1994. Depuis sa fondation, l'ESP a subi plusieurs transformations majeures, notamment la transition de l'Institut Polytechnique (IP) à l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) en 1967, et la reconfiguration en École Supérieure Polytechnique (ESP) en 1994.

Départements :

L'ESP compte six (6) départements :

- Génie Informatique ;
- Génie Chimique et Biologie Appliquée ;
- Génie Civil ;
- Génie Électrique ;
- Génie Mécanique ;
- Gestion.

Dans le cadre de notre formation dans le département Génie Informatique, notre dernière année en cycle ingénieur est caractérisée par une alternance pratique en entreprise. Cette alternance nous a permis de renforcer nos connaissances, d'acquérir un savoir-faire et un savoir-être en nous adaptant aux réalités professionnelles. Nous avons travaillé sur un projet de fin d'études, de son étude préalable à sa mise en œuvre.

De ce fait, nous avons effectué une alternance de neuf (09) mois au sein du **laboratoire de traitement des eaux usées (LATEU)** de l'**IFAN** et nous avons travaillé sur le sujet : **Conception et réalisation d'un système de surveillance du niveau de la nappe Phréatique pour la prévention des inondations à Dakar.**

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception d'un système intelligent de surveillance du niveau de la nappe phréatique à Dakar, une ville régulièrement confrontée aux inondations. Notre projet vise à proposer une solution technologique innovante, peu coûteuse et adaptée au contexte local, en combinant des capteurs simulés, une transmission via MQTT, un traitement avec Node-RED, une base de données MySQL et une interface de visualisation.

Les objectifs de ce travail sont de permettre la collecte, la visualisation et l'exploitation efficace des données hydrologiques en temps réel pour la gestion des inondations, tout en assurant un accès différencié selon les profils d'utilisateurs (Administrateur, DGPPE, ONAS, DA, DRA, Ministère de l'intérieur, Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement). Faute de moyens matériels, une simulation a été mise en place pour valider l'ensemble du fonctionnement du système.

La méthodologie adoptée repose sur une étude du contexte hydrogéologique, une analyse des solutions IoT existantes, et une modélisation SysML pour structurer l'architecture du système. Les résultats montrent la faisabilité de l'approche retenue et ouvrent la voie à un déploiement réel dès que les ressources seront disponibles.

Ce travail contribue au développement de solutions numériques pour la résilience urbaine face aux changements climatiques.

Mots clés : Surveillance, nappe phréatique, inondation, IoT, MQTT, Node-RED, base de données, système embarqué, alerte, Dakar

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé	IV
Liste des tableaux.....	VII
Listes des figures.....	VIII
Liste des acronymes et abréviations.....	IX
Introduction	1
Chapitre 1 : Présentation Générale	2
1.1 Présentation de la structure d'accueil.....	2
1.1.1 L'IFAN	2
1.1.2 Le Laboratoire de Traitement des Eaux Usées (LATEU).....	2
1.2 Présentation du sujet.....	3
1.2.1 Contexte.....	3
1.2.2 Problématique	3
1.2.3 Objectifs du projet	4
1.2.4 Méthodologie adoptée	4
Chapitre 2 : Etude de la nappe et Etat de l'art	5
2.1 Etude de la nappe phréatique de Dakar	5
2.1.1 Caractéristique de la nappe phréatique	5
2.1.2 Les problèmes liés à la nappe	7
2.1.3 Les impacts.....	8
2.1.4 Gestion de la nappe phréatique de Dakar	8
2.2 Etat de l'art.....	9
2.2.1 Présentation de l'internet des objets	9
2.2.2 Les capteurs	10
2.2.3 Les technologies de communications	11
2.2.4 Les solutions de traitement	13
Chapitre 3 : Spécifications fonctionnelles et Conception.....	15
3.1 Spécifications fonctionnelles	15
3.1.1 Objectifs du système.....	Erreur ! Signet non défini.
3.1.2 Les fonctionnalités attendues.....	15
3.1.3 Les contraintes du système.....	15
3.1.4 Identifications des utilisateurs	16
3.2 La Conception	16
3.2.1 Modélisation du système avec SysML	16
3.2.2 Choix de l'architecture globale du système.....	18

3.2.3	Choix des composants	21
Chapitre 4 : Présentation de la solution		24
4.1	Fonctionnalités développées	24
4.2	Intérêt de l'approche par simulation	28
Conclusion générale.....		29
Références		30
Annexes.....		31
Résumé		39
Abstract.....		39

Liste des tableaux

Tableau 2.1 caractéristiques des capteurs ultrasoniques	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.2 caractéristiques des capteurs de pression submersible	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.3 tableau Comparaison des technologies de communication	13
Tableau 3.1 : Tableau comparatif des architectures LoRaWAN	20
Tableau 0.1 Tableau comparatif des capteurs	31
Tableau 0.2 Tableau comparatif des microcontrôleurs	32
Tableau 0.3 Tableau comparatif des modules lora.....	33
Tableau 0.4 Comparaison des passerelles.....	34
Tableau 0.5 Comparaison des plateformes IoT.....	35
Tableau 0.6 : Critères de comparaison des Stack de développement Web	36
Tableau 0.7 Paramètres de dimensionnement.....	37
Tableau 0.8 Calcul de budget.....	38

Listes des figures

Figure 1.1 organigramme de l'IFAN	2
Figure 2.1 délimitation de la nappe de Dakar	5
Figure 2.2 coupe hydrologique de la nappe infrabasaltique	6
Figure 2.3 coupe hydrologique de la nappe des sables quaternaires.....	6
Figure 2.4 problème lié à la nappe infrabasaltique	7
Figure 2.5 problème lié à la nappe de thiaroye	7
Figure 2.6 ouvrage de suivit hydrologique de Dakar.....	8
Figure 2.7 mesure piézométrique manuelle	9
Figure 2.8 couche de bases des IOT	10
Figure 2.9 capteur ultrasonique.....	10
Figure 2.10 capteur de pression submersible	11
Figure 2.11 Architecture de la technologie 2G	12
Figure 2.12 Architecture de la technologie NB-IoT	12
Figure 2.13 Architecture de la technologie LoRaWAN.....	13
Figure 3.1 Diagramme de cas d'utilisation	17
Figure 3.2 Diagramme des exigences	17
Figure 3.3 Diagramme de définition de block	18
Figure 3.4 Diagramme de sequence.....	18
Figure 3.5 Architecture classique LoRaWAN avec TTN	19
Figure 3.6 Architecture LoRaWAN privée.....	20
Figure 3.7 Dimensionnement de couverture du réseau LoRaWAN sur la zone d'étude	23
Figure 4.1 Script python	24
Figure 4.2 Flow node-red.....	25
Figure 4.3 Données dans la base	25
Figure 4.4 Dashboard de visualisation des mesures	26
Figure 4.5 Dashboard de visualisation d'alertes	26
Figure 4.6 Données exporter sous format CSV	27
Figure 4.7 Dashboard de l'administrateur.....	27
Figure 4.8 Dashboard de l'agent de l'ONAS.....	28
Figure 0.1 : Capteur KEJUN 136.....	31
Figure 0.2 Microcontrôleur ESP32	32
Figure 0.3 Module Lora TTGO ESP32 LoRa v1 (SX1276)	33
Figure 0.4 Passerelle LoraWAN Dragino DLOS8N.....	34
Figure 0.5 Stack de développement choisi.....	36

Liste des acronymes et abréviations

Acronyme	Définition
ADC	Analog to Digital Converter
CSV	Comma-Separated Values
CSS	Chirp Spread Spectrum
DA	Direction de l'Assainissement
DGPPE	Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
DRA	Direction Régional de l'Assainissement
GPIO	General Purpose Input/Output
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IFAN	Institut Fondamental d'Afrique Noire
IP	(l'indice de protection)
IoT	Internet of Things
ISM	Industriel, Scientifique et Médical
LATEU	Laboratoire de Traitement des Eaux Usées
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MySQL	Structured Query Language
NB-IoT	NarrowBand Internet of Things
ONAS	Office National de l'Assainissement du Sénégal
PHP	Hypertext Preprocessor
SysML	Systems Modeling Language
TTN	The Things Network
UIT	Union internationale des télécommunications
UML	Unified Modeling Language

Introduction générale

À Dakar, les inondations urbaines sont devenues un problème récurrent, causant d'importants dégâts matériels et sociaux. L'un des facteurs aggravants est la remontée du niveau de la nappe phréatique, due aux fortes précipitations et à l'absence de dispositifs modernes de surveillance. Les systèmes existants, basés sur des relevés manuels ou des stations coûteuses, sont peu adaptés au contexte sénégalais et ne permettent pas une gestion en temps réel des risques. Dans ce contexte, ce mémoire propose la conception et la réalisation d'un système intelligent de surveillance du niveau de la nappe phréatique, s'appuyant sur des technologies IoT accessibles, peu énergivores et autonomes. L'objectif est de développer un prototype fonctionnel, combinant capteurs électroniques, communication sans fil, interface logicielle et visualisation des données.

La démarche que nous avons adoptée repose à la fois sur une analyse théorique des solutions existantes et sur une mise en œuvre technique du système, adaptée aux réalités du terrain. Ce projet a été mené au sein du Laboratoire de Traitement des Eaux Usées (LATEU) de l'IFAN, offrant un cadre propice à l'expérimentation et à l'innovation appliquée.

Le projet repose ainsi sur une double démarche : d'une part, une étude théorique des solutions existantes en matière de monitoring hydrogéologique ; d'autre part, une Conception technique s'appuyant sur des composants électroniques, une programmation embarquée et des outils de traitement et d'affichage de données.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons la structure d'accueil, le sujet ainsi que l'approche méthodologique utilisée tout au long du projet. Le deuxième chapitre consiste à faire l'étude de la nappe phréatique de Dakar et l'état de l'art. Le troisième chapitre se concentre sur la définition des spécifications fonctionnelles et la conception du système. Dans le dernier chapitre, nous faisons la présentation de la solution.

Chapitre 1 : Présentation Générale

Introduction

Ce chapitre présente la structure d'accueil du stage, notamment l'IFAN et son laboratoire LATEU, ainsi que le contexte général du projet de surveillance de la nappe phréatique. Il introduit la problématique, les objectifs visés, et la méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail.

1.1 Présentation de la structure d'accueil

1.1.1 L'IFAN

L'Institut Fondamental d'Afrique Noire (IFAN), rattaché à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, est l'une des plus anciennes institutions de recherche scientifique en Afrique de l'Ouest. Fondé en 1936 [1], il a pour mission de promouvoir la recherche fondamentale et appliquée dans des domaines variés tels que les sciences sociales, naturelles et environnementales.

L'IFAN se distingue par la pluridisciplinarité de ses laboratoires et la diversité de ses projets de recherche qui participent à l'avancement des connaissances dans des secteurs critiques du développement durable.

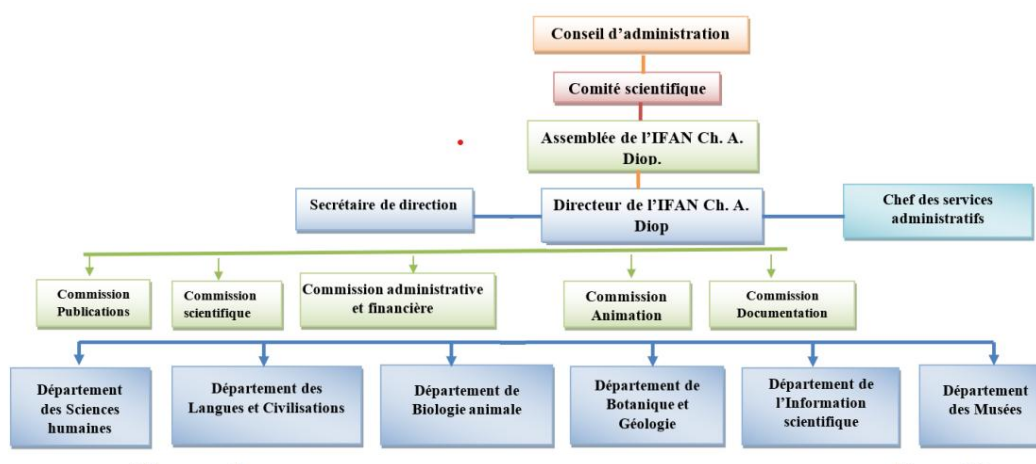


Figure 1.1 organigramme de l'IFAN

1.1.2 Le Laboratoire de Traitement des Eaux Usées (LATEU)

Le Laboratoire de Traitement des Eaux Usées (LATEU) est l'une des unités de recherche spécialisées de l'IFAN. Il se consacre à l'étude, au traitement et à la valorisation des eaux usées ainsi qu'à la gestion durable des ressources en eau.

Ce laboratoire mène des recherches appliquées sur les procédés de traitement, l'analyse de la qualité des eaux, la surveillance hydrogéologique et l'optimisation des systèmes de gestion de l'eau. Il dispose d'équipements adaptés et collabore régulièrement avec des acteurs publics et privés impliqués dans les problématiques environnementales.

Dans le cadre du stage, le LATEU nous a fourni un environnement favorable à l'expérimentation, avec un encadrement scientifique et technique de qualité.

1.2 Présentation du sujet

1.2.1 Contexte

Dakar connaît depuis plusieurs années des épisodes d'inondation récurrents, dont les causes sont multiples : précipitations intenses, urbanisation désorganisée, imperméabilisation croissante des sols (57 % hydromorphes) [2] et absence de politiques de gestion des eaux efficaces. La montée du niveau de la nappe phréatique constitue un facteur aggravant de ces inondations, notamment dans les zones basses et densément peuplées.

En l'absence de dispositifs de surveillance modernes et adaptés, les autorités et acteurs de l'aménagement rencontrent des difficultés à anticiper ces phénomènes. La disponibilité de données en temps réel sur le niveau de la nappe pourrait pourtant permettre une meilleure gestion du risque, notamment dans les phases de prévention et d'alerte.

1.2.2 Problématique

Les systèmes de mesure existants sont souvent inadaptés au contexte local : ils reposent sur des stations coûteuses, à l'entretien complexe, et ne permettent pas une transmission automatisée des données. Exemples : des dataloggers, des stations de surveillance industriels, les images satellites. De plus, ces équipements sont rarement déployés dans les zones urbaines à forte vulnérabilité, où les besoins en information sont pourtant les plus critiques.

Face à ce constat, il devient nécessaire de concevoir une solution accessible, efficace, peu énergivore et capable de fournir des mesures fiables et continues du niveau de la nappe phréatique, dans le but d'améliorer les capacités de réponse face aux inondations.

1.2.3 Objectifs du projet

Notre projet s'inscrit dans une volonté de répondre concrètement aux insuffisances des dispositifs actuels, à travers la conception et la réalisation d'un **système de détection du niveau de la nappe phréatique pour la prévention des inondations à Dakar**, reposant sur des technologies électroniques et numériques modernes. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Réaliser un prototype de capteur connecté permettant de mesurer le niveau de la nappe en continu ;
- Mettre en œuvre une transmission de données en temps réel via une technologie IoT à faible consommation ;
- Développer une interface logicielle de visualisation des données mesurées ;

1.2.4 Méthodologie adoptée

Pour la réalisation de ce projet nous avons adopté une approche méthodologique structurée en plusieurs phases complémentaires :

1. **Phase de recherche documentaire** : étude de la nappe et des solutions existantes en matière de surveillance des nappes phréatiques et des systèmes de capteurs connectés.
2. **Phase de conception** : définition de l'architecture matérielle et logicielle du système, choix des composants, modélisation des flux de données.
3. **Phase de développement** : mise en œuvre du prototype, programmation du microcontrôleur, assemblage des modules électroniques, conception de l'interface logicielle.
4. **Phase d'expérimentation** : déploiement du système sur des sites de test, collecte de données, évaluation de la fiabilité, de la précision et de la robustesse du dispositif.

Conclusion

En somme, ce chapitre a permis de situer le cadre institutionnel et géographique du projet, d'exposer les motivations et les objectifs de la mission, ainsi que la démarche méthodologique suivie. Ces éléments constituent le socle sur lequel reposera le développement technique du système.

Chapitre 2 : Etude de la nappe et état de l'art

Introduction

Ce chapitre propose une analyse hydrogéologique de la nappe phréatique de Dakar, en mettant en évidence ses caractéristiques, les problématiques associées, ainsi que les dispositifs actuels de surveillance. Il présente également un état de l'art des technologies IoT utilisées pour la mesure du niveau d'eau souterraines.

2.1 Etude de la nappe phréatique de Dakar

2.1.1 Caractéristique de la nappe phréatique

La nappe de Dakar est constituée de deux de types de nappe : la nappe infrabasaltique et la nappes des sables quaternaires [3].



Figure 2.1 délimitation de la nappe de Dakar

2.1.1.1 Nappe infrabasaltique

Elle est constituée par les sables marins d'âge quaternaire, à puissance variable. A l'approche du plateau de Dakar, avec le relèvement du mur, les sables infra basaltiques se biseautent pour disparaître finalement. Le toit de l'aquifère est formé par les coulées volcaniques de type basaltique, l'alternance des phases d'éruption et de repos fait que l'on n'a pas un toit homogène. Par endroit on distingue des alternances de niveaux volcaniques et sableux ainsi les variations de puissance du toit conditionnent les possibilités de réalimentation de la nappe [4].

Les sables reposent sur les argiles et les marnes de l'Eocène inférieur. Cet ensemble imperméable affleure seulement au Sud et se poursuit vers le Nord-Est. Au-delà de la limite orientale d'extension du recouvrement basaltique, la nappe devient libre et se confond avec la nappe de Thiaroye. La profondeur de cette nappe peut atteindre les 30 mètres.

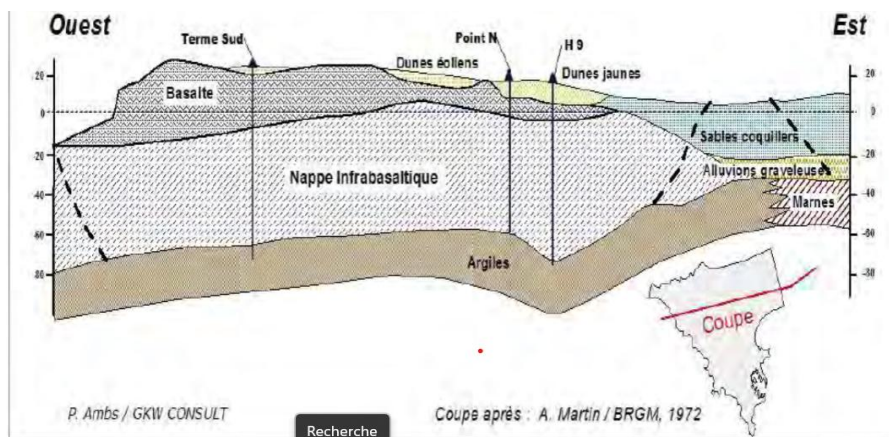


Figure 2.2 coupe hydrologique de la nappe infrabasaltique [4]

2.1.1.2 Nappe des sables quaternaires

L'ensemble hydrogéologique appelé nappe de Thiaroye, comprend le puissant massif dunaire caractérisée essentiellement par les Niayes, qui sont des dépressions inter dunaires. Ces bas-fonds se transforment généralement en marécages pendant la saison des pluies ; l'eau disparaît en saison sèche [5]. Toutes ces cuvettes sont en effet inondées temporairement par les fluctuations de la nappe phréatique. Dans toute sa partie Nord, la nappe est en contact avec l'océan, la nature de l'aquifère est variée ; sables argileux à la base, sables grossiers puis sables éoliens bien classés au sommet. Le substratum de la nappe est formée par les marnes et argiles de l'Eocène inférieur. La nappe de Thiaroye est exploitée dans deux zones : Thiaroye et Beerthialane et dans tous les Niayes par les agriculteurs. L'aquifère est en totalité libre c'est un réservoir alimenté par l'infiltration directe des pluies. La profondeur de la nappe peut atteindre les 16 mètres.

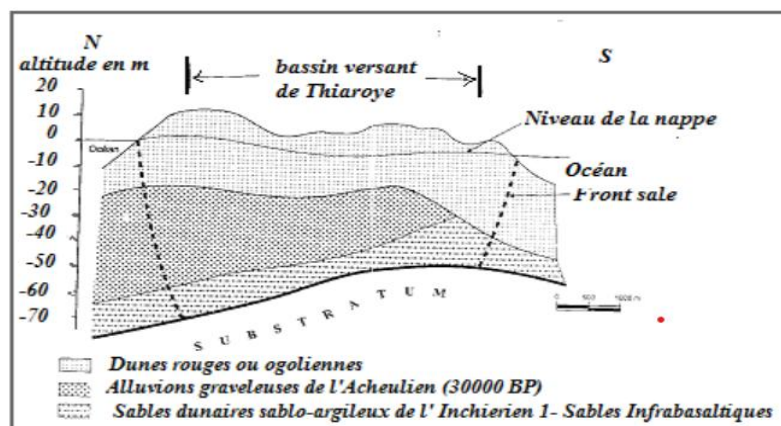


Figure 2.3 coupe hydrologique de la nappe des sables quaternaires [6]

2.1.2 Les problèmes liés à la nappe

2.1.2.1 Nappe infrabasaltique

L'exploitation de la nappe infrabasaltique a entraîné une infiltration d'eau salée dans la nappe, entraînant un arrêt des exploitations [6]. Lors de la saison des pluies, la nappe étant recouverte de couche de basalte (peu perméable), l'eau stagne en surface et ruisselle vers les zones basses (où la nappe se recharge) [7]. La piézométrie montre une hausse de la nappe durant la saison des pluies, entraînant la stagnation des eaux pluviales dans les zones basses.

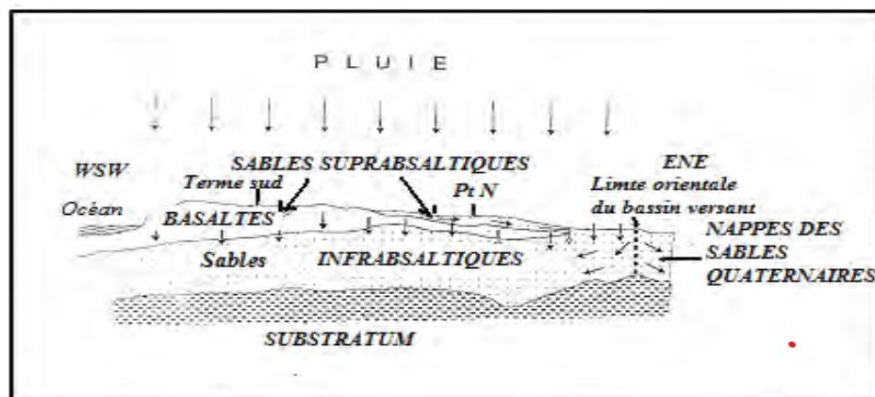


Figure 2.4 problème lié à la nappe infrabasaltique [7]

2.1.2.2 Nappe des sables quaternaires

Dans la banlieue de Dakar, la baisse des précipitations et l'intensification des pompages ont entraîné la diminution du niveau statique de la nappe de Thiaroye, autrefois affleurant, notamment à Pikine. Combinée à une forte croissance démographique, cette situation a provoqué une urbanisation anarchique dans les zones basses. Avec le temps, le niveau de la nappe est remonté, en raison du manque d'assainissement (rejets d'eaux usées) et de pluies exceptionnellement abondantes [7]. Cette remontée cause des inondations fréquentes et graves, affectant surtout les populations pauvres vivant dans ces zones vulnérables.

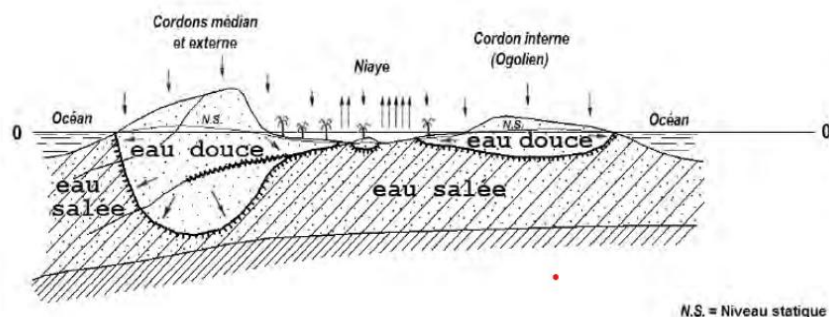


Figure 2.5 problème lié à la nappe de thiaroye [7]

2.1.3 Les impacts

Les problèmes liés à la nappe phréatique de Dakar (notamment la remonté du niveau de la nappe) entraînent des problèmes suivants :

- Dégâts matériels : Les inondations endommagent les habitations, les infrastructures (routes, écoles, etc.), et les biens des ménages.
- Pertes économiques : Les inondations entraînent des pertes de revenus pour les ménages, des interruptions d'activité pour les commerçants, et des coûts pour les entreprises.
- Problèmes de santé : Les eaux stagnantes favorisent la prolifération de maladies liées à l'eau (diarrhée, paludisme, etc.).

2.1.4 Gestion de la nappe phréatique de Dakar

La DGPRE est chargée de la gestion des ressources en eau au Sénégal, en assurant le suivi régulier des ouvrages comme les forages et piézomètres. Elle utilise un réseau d'ouvrages hydrologique (puits, forages, piézomètre) pour le suivi des ressources hydrauliques souterraines [8].



Figure 2.6 ouvrage de suivi hydrologique de Dakar

Les mesures se font par saison (crue, étiage) sur site par sonde piézométrique

Ces mesures ne sont pas efficaces car :

- Nous avons un manque de données piézométrique en temps réel.
- Nous avons un manque de connaissance en temps réel de l'évolution de la piézométrie



Figure 2.7 mesure piézométrique manuelle

2.2 Etat de l'art

2.2.1 Présentation de l'internet des objets

L'Internet des objets (IoT) permet à chaque objet d'avoir une identification unique et de communiquer automatiquement, offrant contrôle et services à distance dans divers domaines comme la santé, la domotique ou l'industrie. Le modèle de référence de l'IoT proposé par l'UIT comprend quatre couches [9] :

- La couche de Perception : Cette couche regroupe les capteurs et actionneurs : elle collecte les données et agit sur l'environnement.
- La couche réseau : cette couche assure la transmission des données entre les dispositifs et les envoie vers les services appropriés.
- La couche de traitement : Cette couche aussi appelé middleware traite, stocke et analyse les données, souvent en périphérie du cloud pour réduire la latence.
- La couche application : cette couche est l'interface visible par l'utilisateur, permettant le contrôle ou la visualisation des dispositifs d'un système.

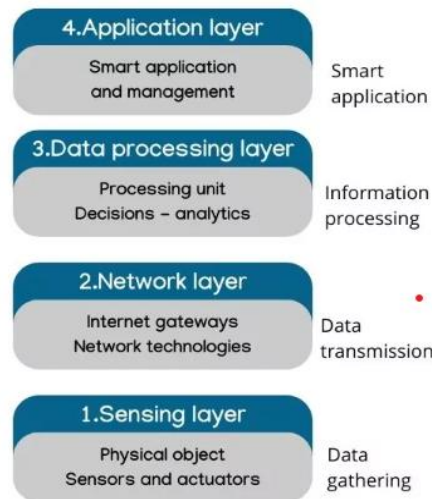


Figure 2.8 couche de bases des IOT

2.2.2 Les capteurs

Les capteurs de mesure de niveau d'eau utilisée pour la surveillance de la nappe phréatique sont :

- Le capteur de niveau d'eau ultrasonique : Le principe de fonctionnement des sondes de mesure des niveaux de liquide à ultrason repose sur l'exploitation du temps de transit d'une impulsion d'ondes ultra-sonique entre la surface inférieure de la sonde ultrasonique et la surface du liquide à mesurer. Ces capteurs sont efficaces mais trop sensibles au condition externe (vent, pluies, onde électromagnétique).

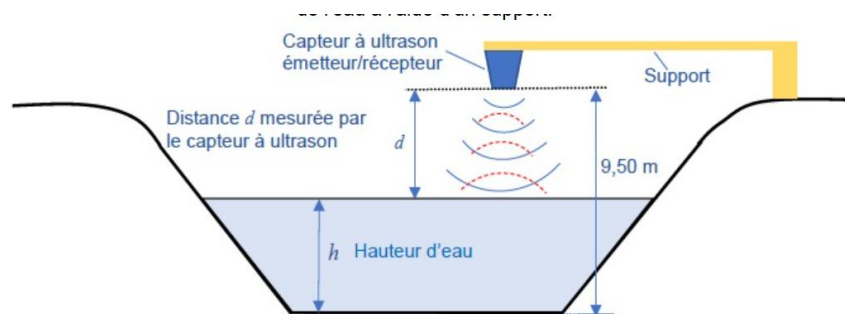


Figure 2.9 capteur ultrasonique

- Capteurs de pression submersibles : Ils mesurent la pression hydrostatique qui est proportionnelle à la hauteur du liquide située au-dessus du capteur. Cette technologie est adaptée uniquement aux liquides.

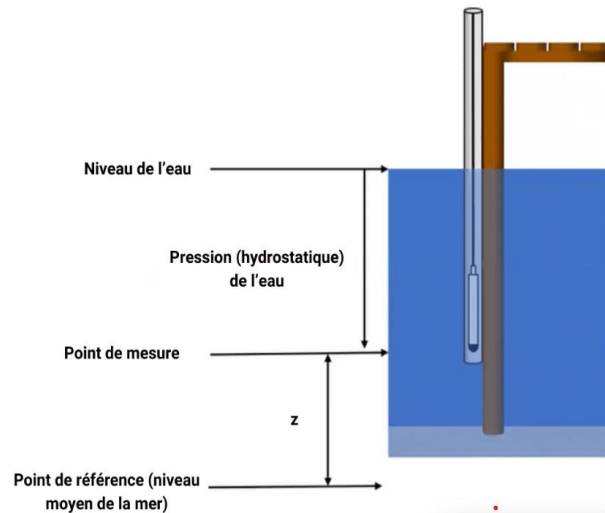


Figure 2.10 capteur de pression submersible

2.2.2.1 Etude comparatif des capteurs

Tableau 2.1 : Tableau de comparaison des capteurs

Critère/Capteur	Plage de mesure	Tension d'entrée	Tension sortie de	Précision
Ultasonique	0-10 m	10Vcc-40Vcc	4-20mA	± 0.01 m à ± 0.03 m
De pression submersible	+100m	5Vdc-24Vdc.	4-20mA	± 0.01 m à ± 0.05 m

Les capteurs de pression submersibles offrant des plages de mesure qui couvre nos installations hydrologiques et une résistivité au conditions externes, sont plus adapté à notre projet.

2.2.3 Les technologies de communications

Pour permettre un suivi en temps réel, les capteurs doivent être associés à un système de transmission de données. Plusieurs technologies sont utilisées (2G, NB-IoT, LoraWAN).

2.2.3.1 La technologie 2G

La 2G est la deuxième génération des réseaux mobiles cellulaires, introduite au début des années 1990. C'est la première génération numérique, succédant à la 1G analogique. Elle utilise les bandes de fréquences (900 Mhz,1800 Mhz,850 Mhz et 1900 Mhz). L'IoT a adapté la norme GSM pour permettre aux objets connectés de transmettre des données sur de longues distances (10km en zone urbaine,35kmen zone rurale), même à faible débit (4-64kbps), ce qui est avantageux pour les entreprises à l'échelle internationale [10].

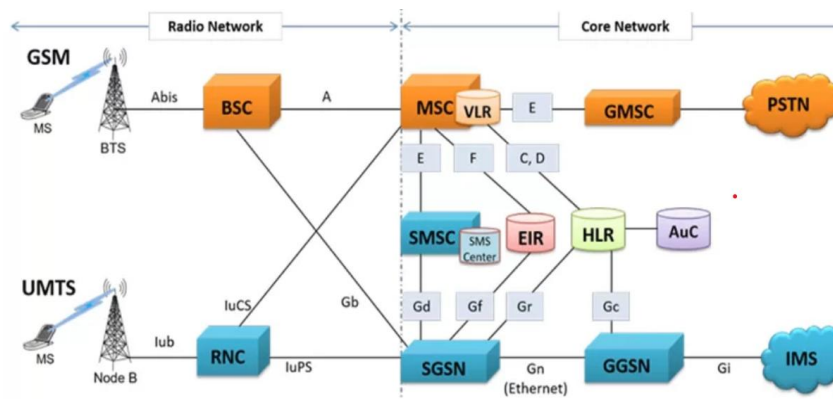


Figure 2.11 Architecture de la technologie 2G [10]

2.2.3.2 La technologie NB-IoT

Le Nb-IoT, développé à partir de la technologie de Neul rachetée par Huawei en 2014, est une norme de connectivité longue portée pour l'IoT. Il utilise des bandes étroites issues du GSM ou du LTE : 800 MHz (bande 20), 900 MHz (bande 8), 1800 MHz (bande 3) [11]. Elle offre une portée jusqu'à 10 km et un débit de 20 à 250 Kbits/s avec communication bidirectionnelle.

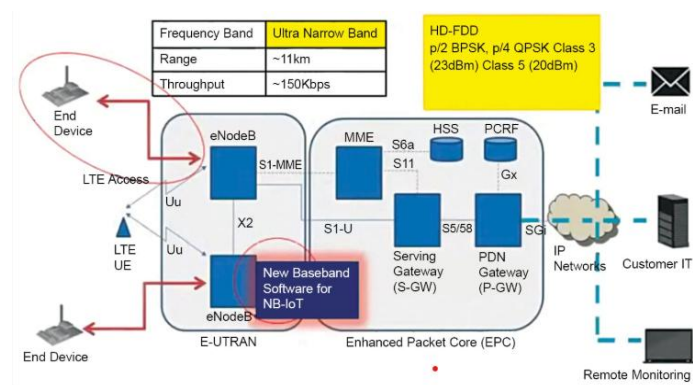


Figure 2.12 Architecture de la technologie NB-IoT [11]

2.2.3.3 La technologie LoRaWAN

Le succès de SigFox a stimulé l'essor des réseaux LPWAN, dont LoRaWAN, basé sur la technologie LoRa développée par la start-up française Cycleo (rachetée par Semtech en 2012). Depuis 2015, LoRaWAN est porté par la LoRa Alliance [12]. Le réseau fonctionne en trois étapes : envoi des données capteurs vers les passerelles via LoRa, transmission au cloud via IP (Ethernet, Wifi, 3G/4G), puis accès utilisateur via Internet. LoRa utilise des bandes ISM sans licence (868 MHz, 915 MHz) et la modulation CSS pour des communications bidirectionnelles.

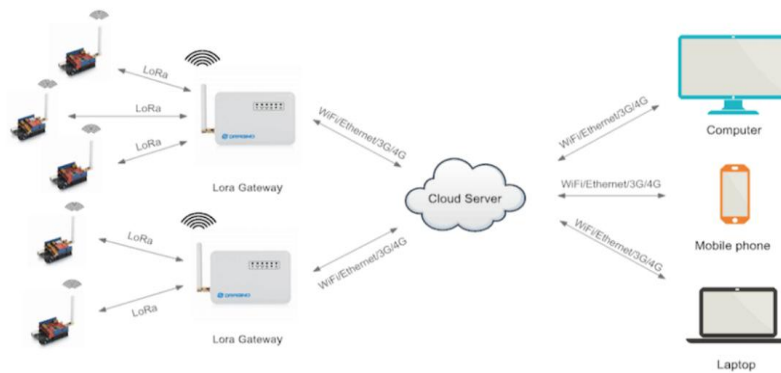


Figure 2.13 Architecture de la technologie LoraWAN [12]

2.2.3.4 Etude comparative des technologies

Tableau 2.2 tableau Comparaison des technologies de communication

Critères	2G	NB-IoT	LoRaWAN
Débit	64kbps	250kbps	50kbps
Consommation énergétique	++	-	--
Coût de déploiement	++	+	-
Disponibilité réseau	Existante	Inexistante	Existante
Type de fréquence	sous licence	sous licence	libre
Sécurité	pas bonne	très bonne	bonne

Le LoRaWAN, grâce à sa faible consommation d'énergie, sa longue portée et son coût de déploiement pas trop cher, est idéal pour notre projet.

2.2.4 Les solutions de traitement

La couche de traitement accumule, stocke et traite les données provenant de la couche précédente. Toutes ces tâches sont traitées via des plateformes IoT. Une plateforme IoT est un

ensemble de services permettant de collecter, stocker, corréler, analyser et exploiter les données. On en distingue deux types [13]:

- **Les plateformes cloud IoT** : Ce sont des services IoT hébergés dans le cloud par les fournisseurs. Le traitement des données est centralisé dans le cloud et permettent donc une mise en œuvre rapide tout en permettant de traiter de très grande volume de données. Cependant, ces solutions sont payantes à l'usage et offre peu de personnalisation. Exemple : AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Oracle IoT Cloud, etc.
- **Plateformes Open Source et Edge Computing** : Ce sont des services IoT Open Source en local ou hybride, offrant une personnalisation très élevée et une indépendance de toute entreprise externe. Mais nécessitant une configuration manuelle et des compétences systèmes. Exemple : Node-RED, ThingsBoard, EdgeX Foundry, etc.

Les plateformes Open source et Edge Computing sont plus adapté à notre projet car elles nous offrent plusieurs possibilités de personnalisation et une intégration facile à notre projet.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre les spécificités de la nappe phréatique de Dakar et les limites des méthodes actuelles de suivi. L'état de l'art a mis en lumière des solutions technologiques pertinentes, orientant ainsi le choix d'une approche IoT adaptée.

Chapitre 3 : Spécifications fonctionnelles et Conception

Introduction

Ce chapitre présente la transformation des besoins en spécifications fonctionnelles, suivie de la conception technique du système. Il expose les fonctionnalités attendues, les contraintes identifiées, ainsi que les profils utilisateurs. La modélisation SysML et le choix des composants (capteurs, microcontrôleurs, modules LoRa, passerelle) sont justifiés selon des critères de performance, de coût et d'autonomie. Enfin, un dimensionnement et une budgétisation du système complètent cette phase de conception.

3.1 Spécifications fonctionnelles

3.1.1 Les fonctionnalités attendues

Les fonctionnalités que le système doit implémenter sont les suivantes :

- **Mesure du niveau** : Le capteur mesure automatiquement le niveau d'eau dans un puits ou un forage.
- **Acquisition périodique** : L'unité centrale déclenche la lecture du capteur toutes les 1h.
- **Transmission des données** : Les données sont envoyées via le protocole Lora à une passerelle connectée à Internet.
- **Affichage web** : Les données sont consultables sur une application web avec Tableau de bord, graphique et historique.
- **Génération d'alarmes** : Le système déclenche une alerte si un seuil critique est atteint.
- **Archivage des données** : Les données sont stockées pour une analyse ultérieure, avec export possible en fichier (.pdf/csv).
- **Gestion des seuils** : L'utilisateur peut définir ou modifier les seuils d'alerte via l'interface.

3.1.2 Les contraintes du système

Les contraintes liées au contexte d'utilisation que le système devra respecter sont les suivantes

- **Énergétiques** : Le système doit être autonome en énergie, alimenté par panneau solaire et batterie rechargeable.
- **Environnementales** : Les composants doivent être résistants aux intempéries, à l'humidité et à la chaleur.
- **Budgétaires** : Le coût global doit rester compatible avec un déploiement à grande échelle dans des zones sensibles.

3.1.3 Identifications des utilisateurs

Administrateur : Il est responsable de la gestion globale de la plateforme. Il peut :

- Créer, modifier ou supprimer les comptes des agents DGPRES et ONAS,
- Configurer les capteurs (localisation, paramètres, seuils d'alerte),
- Superviser le fonctionnement du système et accéder à toutes les données.

Agent de la DGPRES : Il représente l'autorité de suivi hydrologique. Il peut :

- Consulter les données de surveillance en temps réel,
- Recevoir des alertes concernant tous les points lorsque des seuils critiques sont atteints.
- Exporter les données pour analyse,

Agent de l'ONAS, Agent de la DA, Agent de la DRA, Agent du ministère de l'intérieur, Agent du ministère de l'hydraulique et de l'assainissement : Ils sont principalement impliqués dans la gestion des risques liés à l'assainissement et aux inondations. Ils ont un accès limité aux données :

- Visualisation des alertes par zone, avec le pourcentage de risque d'inondation,
- Visualisation du type d'alerte et de la date,
- Sans afficher ni le capteur ni le niveau exact de la nappe.

3.2 La Conception

3.2.1 Modélisation du système avec SysML

Le langage SysML de l'OMG est un outil graphique polyvalent pour modéliser, analyser et concevoir des systèmes complexes. Il étend UML 2 pour répondre aux besoins de l'ingénierie des systèmes, permet de modéliser exigences, comportements et structures, et facilite l'échange de données via les formats XMI et ISO10303-233.

1. **Diagramme de cas d'utilisation** : Ce diagramme décrit les interactions des utilisateurs avec le système.

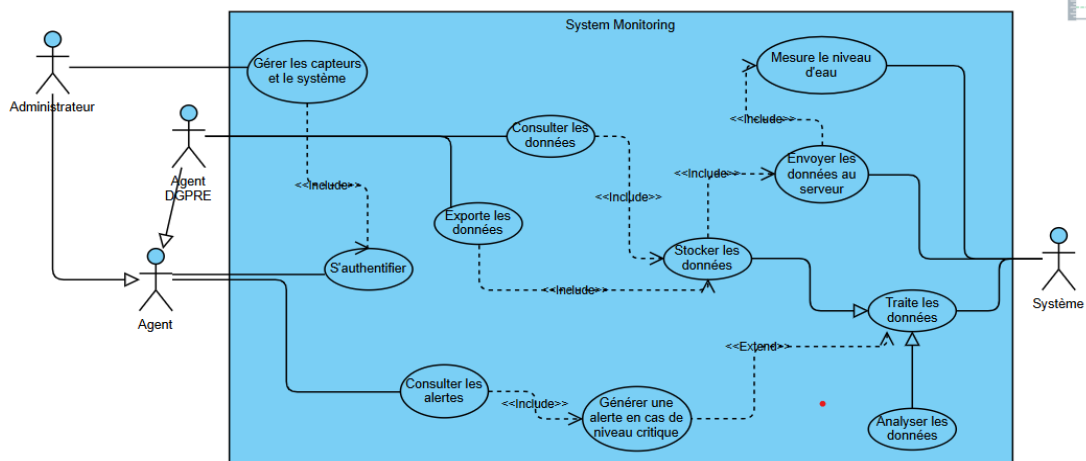


Figure 3.1 Diagramme de cas d'utilisation

2. **Diagramme des exigences :** Dans ce diagramme nous avons décrit les exigences du système.

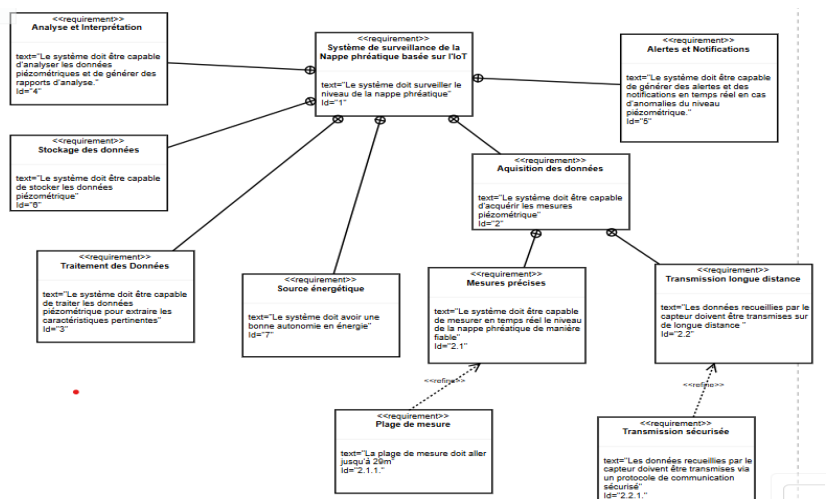


Figure 3.2 Diagramme des exigences

3. **Diagramme de définition de bloc :** Dans ce diagramme nous avons défini les composants du système de surveillance ainsi que les relations entre eux.

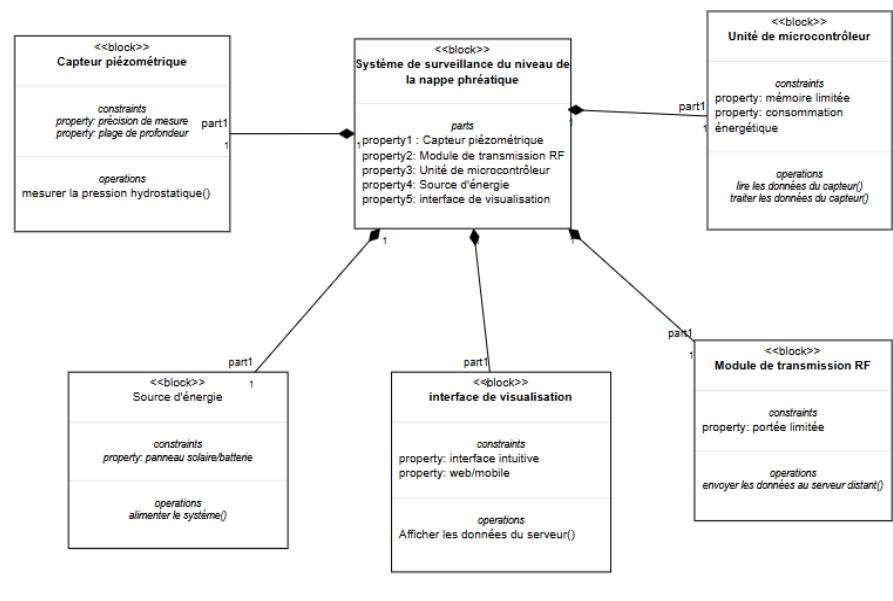


Figure 3.3 Diagramme de définition de block

4. **Diagramme de séquences :** Ce diagramme nous fournit une carte séquentielle des messages passant entre les objets au fil du temps.

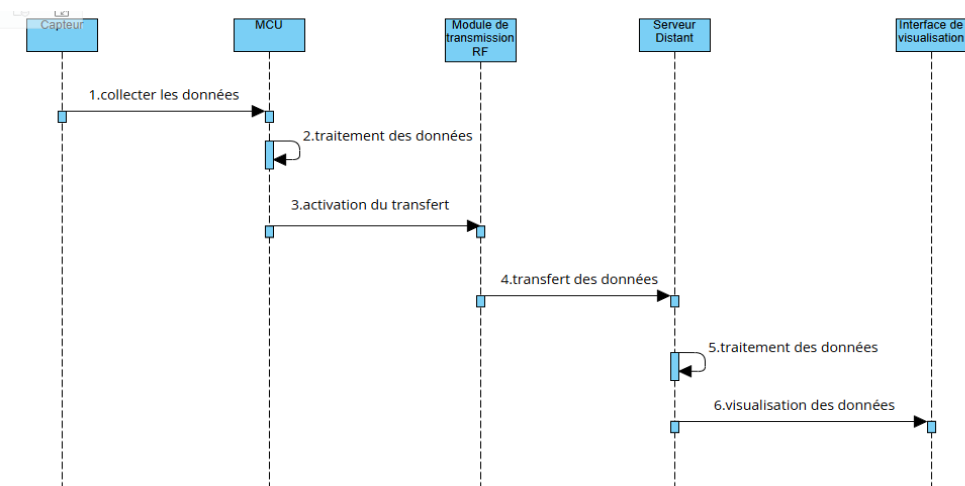


Figure 3.4 Diagramme de sequence

3.2.2 Choix de l'architecture globale du système

Il est essentiel de définir une architecture globale du système afin de visualiser clairement ses composants clés, leurs interactions et les flux de données. Le système adopte une architecture à 4 couches des solutions IoT. Le choix de la technologie LoRaWAN pour la transmission

s'explique par son faible coût, sa résilience face au bruit et sa faible consommation énergétique, ce qui en fait une solution adaptée à un déploiement durable et efficace.

Cependant il existe plusieurs types d'architecture LoRaWAN parmi lesquelles nous avons : l'architecture classique LoRaWAN avec TTN (Cloud public) et l'architecture LoRaWAN privée.

3.2.2.1 Architecture classique LoRaWAN avec TTN (Cloud public)

Cette architecture repose sur l'utilisation d'un serveur LoRaWAN hébergé dans le cloud, notamment via la plateforme The Things Network (TTN). Les capteurs LoRa envoient leurs données vers une passerelle LoRaWAN, qui transmet ensuite les paquets vers le serveur réseau TTN via Internet. Ce dernier se charge du déchiffrement, de la gestion des identifiants, et du routage des messages vers le serveur applicatif TTN, qui expose les données via des interfaces telles que MQTT, HTTP ou Webhooks. Ces données peuvent ensuite être exploitées par un système local. Cette solution est idéale pour les projets légers à moyens, car elle ne nécessite aucune infrastructure serveur locale et permet une mise en œuvre rapide avec un bon niveau de fiabilité.

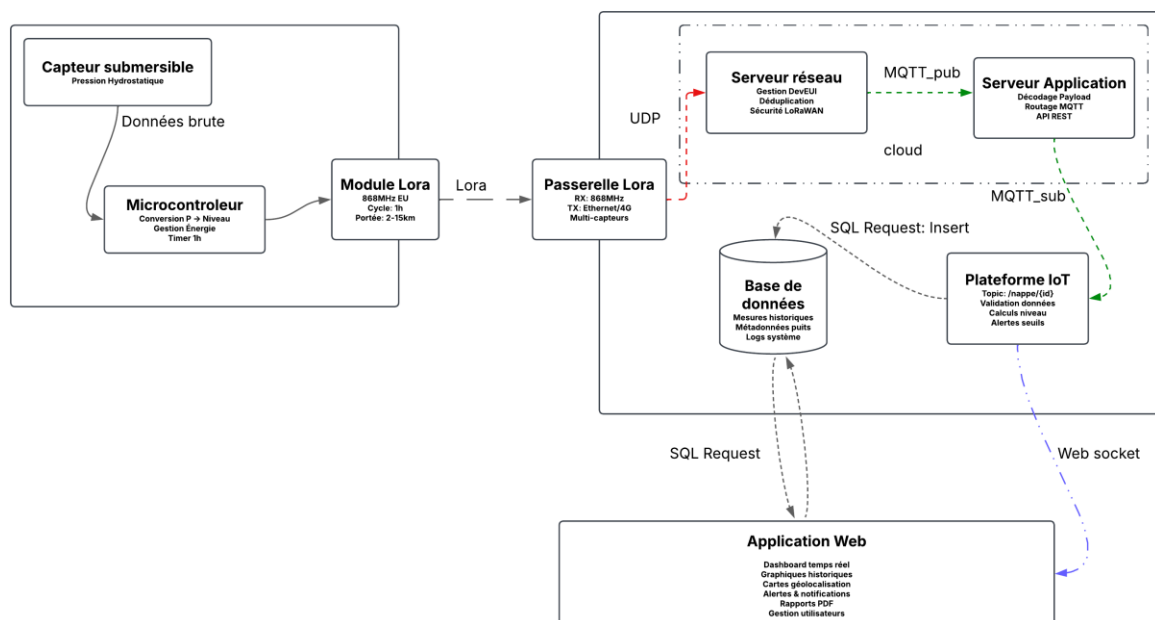


Figure 3.5 Architecture classique LoRaWAN avec TTN

3.2.2.2 Architecture LoRaWAN privée.

Dans cette architecture, l'ensemble de l'infrastructure LoRaWAN est hébergé localement ou sur un serveur privé. Le Network Server et l'Application Server sont donc entièrement

maîtrisés par l'utilisateur, permettant un contrôle total des données, des clés de sécurité, et de la logique applicative. Les données sont ensuite exposées en MQTT ou HTTP pour traitement local. [14] Ce type d'architecture est plus complexe à mettre en œuvre, mais il convient mieux à des projets sensibles ou déployés à grande échelle, où la souveraineté des données et l'indépendance du cloud sont cruciales.

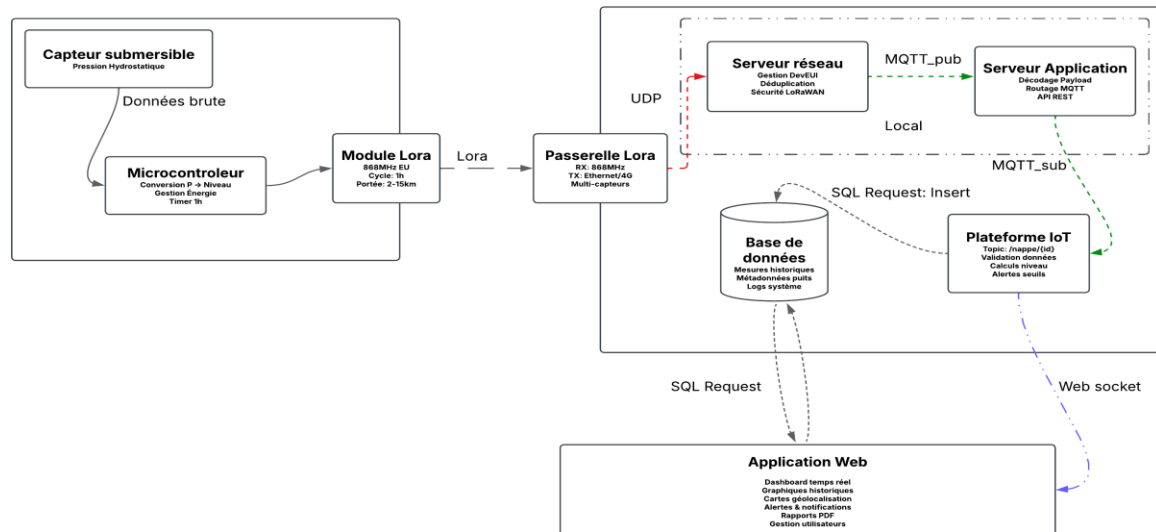


Figure 3.6 Architecture LoRaWAN privée

3.2.2.3 Tableau comparatif des architectures

Tableau 3.1 : Tableau comparatif des architectures LoRaWAN

Critère	Architecture LoRaWAN privée.	Architecture classique LoRaWAN
Déploiement	Installation et configuration manuelle	prêt à l'emploi
Évolutivité	Adapté aux déploiements à grande échelle	Moins adapté aux déploiements à grande échelle
Cout	Elevé	Gratuit via TTN
Complexité technique	Haute	Faible

L'architecture classique LoRaWAN est plus adaptée à notre projet, car elle nous offre une plateforme fonctionnelle qui satisfait nos besoins et un déploiement rapide de notre solution.

3.2.3 Choix des composants

3.2.3.1 Choix du capteur

Le capteur doit mesurer avec précision le niveau de la nappe phréatique dans un puits ou forage, de manière continue et autonome. Le choix du capteur que nous avons utilisé est guidé par plusieurs critères de comparaison tel que : la plage de mesure(1-30m), la précision de mesure, la compatibilité matérielle, la tension d'alimentation, le coût et l'étanchéité (Indice IP) [cf : *annexe 1*]. Nous avons choisi le capteur de pression immergeable KEJUN136 [cf : *annexe1*] car il est le moins cher tout en nous offrant une plage de mesure et des critères qui satisfait nos besoins.

3.2.3.2 Choix du microcontrôleur

Le microcontrôleur est l'unité centrale qui pilote le capteur, collecte les données, les traite localement, puis les transmet via un module LoRa. Le choix du microcontrôleur est basé sur des critères suivants : le nombre de GPIO, la mémoire RAM, la compatibilité avec les modules Lora, l'alimentation, la facilité de programmation et le prix. [cf : *annexe2*]

Notre choix s'est porté sur le ESP32 [cf : *annexe2*] car il nous offre des capacités de traitement bien meilleur qui satisfait nos besoins.

3.2.3.3 Choix du module de transmission Lora

Le module Lora assure la transmission longue portée des données du capteur vers une passerelle LoRaWAN. Plusieurs sont proposées sur le marché. Nous avons les modules du type Sx127x (Sx1276, Sx1278 ...) chacun de ces modules fonctionne sur une gamme de fréquences bien définis. Le choix du module de transmission est basé sur les critères suivants : la bande de fréquence (868 MHz), la sensibilité (inférieur à 148 dBm), la puissance d'émission, la portée (au minimum 3 km) et le prix. [cf : *annexe 3*]

Notre choix s'est porté sur le TTGO ESP32 LoRa v1(SX1276) [cf : *annexe 3*], car il nous offre des performances tel que la bande de fréquence autorisée au Sénégal, une meilleure portée de plus il nous permet d'économiser pour le microcontrôleur car il a ESP32 directement intégrée.

3.2.3.4 Choix de la passerelle

La passerelle LoRaWAN assure la réception des paquets LoRa émis par les nœuds puis leur transfert via Internet vers le serveur applicatif. Elle constitue donc le pont entre notre réseau radio local et le cloud. Nous avons opté pour des passerelles Extérieure. Le choix de la passerelle s'est basé sur les critères suivants : La bande de fréquence supportée (868 Mhz), le

nombre de canaux, la connectivité Internet, la portée en réception, l'indice d'étanchéité et le Prix. [cf : annexe 4]

Notre choix s'est porté sur la passerelle Dragino DLSOS8N car il couvre largement nos besoins en plus d'être le moins cher. [cf : annexe 4]

3.2.3.5 Choix de la plateforme IoT

Une plateforme IoT est essentielle dans un système de surveillance, car elle permet de collecter, traiter, visualiser et exploiter les données des capteurs en temps réel. Elle facilite la détection rapide des anomalies et aide les acteurs à prendre des décisions efficaces, comme déclencher une alerte en cas de risque d'inondation. Le choix de la plateforme IoT s'est basé sur des critères tel que : le type, la facilité d'installation, les protocoles supportés, le mode de traitement des données, la consommation de ressources. [cf : annexe 5]

Notre choix s'est porté sur node-red car il nous offre plus de flexibilité en plus d'être gratuit. [cf : annexe 5]

3.2.3.6 Application Web

Les technologies web jouent un rôle fondamental dans la création de sites et d'applications modernes. Chaque composant – du front-end (interface utilisateur) au back-end (logique serveur) en passant par les bases de données – repose sur des outils et langages spécifiques qui déterminent la performance, la sécurité, l'ergonomie et l'évolutivité d'un projet. Le choix des technologies web est basé sur de choix tel que : La facilité d'apprentissage, la facilité d'hébergement, la documentation, l'intégration, temps de développement, maintenance [cf : annexe 6].

Notre choix s'est portée sur le stack PHP+Mysql+Bootstrap car il nous offre une facilité d'intégration et un hébergement rapide [cf : annexe 6].

3.2.3.7 Dimensionnement

Dans le dimensionnement nous cherchons à déterminer le nombre optimal de passerelles LoRaWAN et de capteurs nécessaires pour couvrir efficacement la zone d'étude. Cette étape prend en compte la portée réelle des équipements, les obstacles du terrain (bâtiments, reliefs), ainsi que les besoins spécifiques du projet en matière de couverture et de fiabilité [cf : annexe 7]. Elle permet d'éviter le suréquipement tout en garantissant une transmission fiable des données, en particulier dans un environnement urbain dense comme celui de Dakar. Le dimensionnement assure donc un équilibre entre performance technique et coût maîtrisé.

$$surface\ effective = \pi \times R^2 \times \alpha = 47,12 \quad (3.1)$$

$$nombre\ de\ passerelle = \frac{surface\ effective}{surface\ totale} = 12 \quad (3.2)$$

NB : Mais vu que nos capteurs sont éparpillés dans la zone et qu'ils sont fixes donc nous avons procédé à une approximation du nombre de capteur qui pourra suffire pour notre projet



Figure 3.7 Dimensionnement de couverture du réseau LoRaWAN sur la zone d'étude

3.2.3.8 Budgétisation

La budgétisation du système nous a permis d'estimer les ressources matérielles et financières nécessaires à la mise en place d'un réseau IoT complet pour la surveillance de la nappe phréatique. Chaque poste de dépense a été évalué selon les composants choisis (capteurs, modules LoRa, passerelles, etc.) et adapté au contexte local, en tenant compte du rapport coût-efficacité.

L'objectif est de proposer une solution fiable, modulaire et économiquement viable, pouvant être déployée progressivement. Le budget total du projet est de : **2 162 446 FCFA** [cf : annexe 8].

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir une architecture IoT adaptée au suivi de la nappe phréatique, en précisant les choix techniques, les contraintes, et le dimensionnement du système. L'ensemble des éléments présentés constitue une base solide pour la phase de réalisation ou de simulation du dispositif.

Chapitre 4 : Présentation de la solution

Introduction

Dans cette section, nous présentons la solution technique développée pour la surveillance du niveau de la nappe phréatique à Dakar. En raison de contraintes budgétaires n'ayant pas permis l'accès aux équipements matériels (capteurs, microcontrôleurs, passerelles LoRa, etc.), une approche par simulation logicielle a été privilégiée. Cette solution simule l'envoi de données en temps réel, permet leur traitement, leur visualisation, ainsi que leur exploitation via une interface web connectée à une base de données.

4.1 Fonctionnalités développées

Malgré l'absence de matériel physique, la solution que nous avons mise en place couvre l'ensemble des fonctionnalités prévues :

- **Simulation d'acquisition** : Notre script Python simule des lectures de niveau d'eau toutes les heures, comme le ferait un capteur réel.

```
PS C:\Users\paped> cd C:\Users\paped\Desktop\Mémoire\plateforme
PS C:\Users\paped\Desktop\Mémoire\plateforme> python .\script_mqtt_test.py
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : aeroport yoff p1 - 11.86 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : bayakh ps-10 - 3.78 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : boune p2-6 - 1.1 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : cimetière yoff p1 - 9.07 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : dakar mamelles bad p2 bas bis - 8.83 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : dakar mamelles bad p2 haut bis - 7.99 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : gouye guewel p2-10 - 0.53 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : hann p - 0.12 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : km5 seydou nourou - 11.08 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : niaga peulh p2-9 - 1.64 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : ouakam cite amar - 3.18 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : ouakam cité mbackyou faye bad 3 - 8.01 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : ouakam pib2 - 12.87 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : parcelles assainies pib3 - 0.77 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : sangalkam 3 - 1.38 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : sangalkam ps 1-ii haut - 0.63 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : sangalkam ps1-i bas - 0.52 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : thiaroye/mer p3-1 - 0.32 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : bayakh ps-11 - 2.11 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : camberene p2-2 bis - 1.47 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : guediawaye p2-5 - 0.4 m
[2025-06-24 17:46:07] ✓ Envoyé : aeroport yoff bad p4 bas bis - 12.88 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : bayakh ps-12 - 0.32 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : boune p2-6 - 0.76 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : stade léopold senghor p1 - 10.03 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : sangalkam 3 - 4.1 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : aeroport yoff p1 - 19.11 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : camberene p2-2 bis - 1.75 m
[2025-06-24 17:46:08] ✓ Envoyé : cimetiere yoff p1 - 8.83 m
```

Figure 4.1 Script python

- **Transmission des données via MQTT** : Les messages publiés sur un topic MQTT sont automatiquement captés par Node-RED.

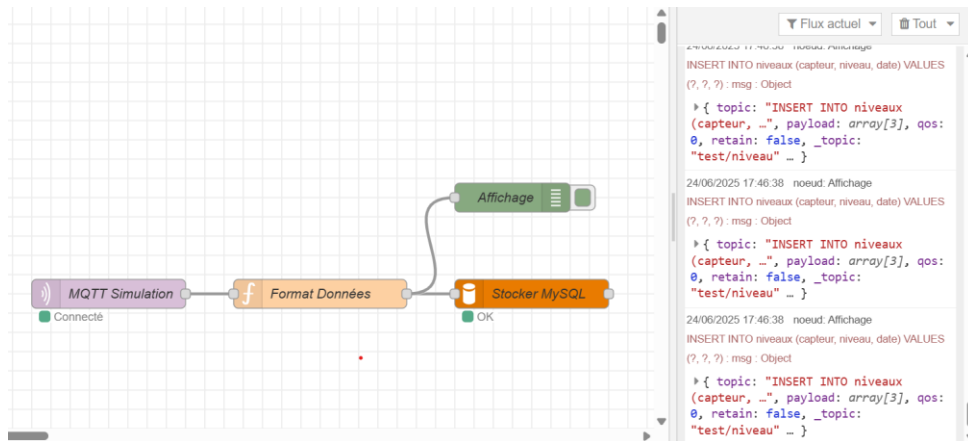


Figure 4.2 Flow node-red

- **Intégration et stockage dans MySQL** : Les données reçues sont enregistrées dans une base de données MySQL.

```
mysql> SELECT * FROM niveaux order by date desc limit 100;
```

id	capteur	niveau	date
2272	tivaouane peulh p2-7	3.3	2025-06-24 17:49:10
2271	sangalkam p1 aumn	0.11	2025-06-24 17:49:10
2270	guediawaye p2-3	0.87	2025-06-24 17:49:10
2258	sangalkam 3	2.82	2025-06-24 17:49:09
2236	cimetière yoff p1	7.01	2025-06-24 17:49:09
2251	bayakh ps-11	1.15	2025-06-24 17:49:09
2233	aéroport yoff p1	13.14	2025-06-24 17:49:09
2239	gouye guewel p2-10	6.48	2025-06-24 17:49:09
2249	sangalkam ps1-i bas	0.34	2025-06-24 17:49:09
2244	ouakam cité mbackyou faye bad 3	8.14	2025-06-24 17:49:09
2266	stade leopold senhor p1	10.9	2025-06-24 17:49:09
2259	aéroport yoff p1	13.24	2025-06-24 17:49:09
2237	dakar mamelles bad p2 bas bis	8.45	2025-06-24 17:49:09
2245	ouakam pib2	13.01	2025-06-24 17:49:09
2263	dakar mamelles bad p2 haut bis	8.94	2025-06-24 17:49:09
2262	dakar mamelles bad p2 bas bis	11.21	2025-06-24 17:49:09
2268	aéroport yoff bad p4 bas	11.97	2025-06-24 17:49:09
2241	km5 seydou nourou	7.86	2025-06-24 17:49:09
2269	tivaouane peulh p2-8	2.36	2025-06-24 17:49:09
2248	sangalkam ps 1-ii haut	3.45	2025-06-24 17:49:09
2242	niaga peulh p2-9	1.02	2025-06-24 17:49:09
2240	hann p	0.61	2025-06-24 17:49:09
2260	camerene p2-2 bis	2.95	2025-06-24 17:49:09

Figure 4.3 Données dans la base

- **Visualisation des mesures** : Nous avons développé un tableau de bord web pour permettre la consultation en temps réel les données collectées.

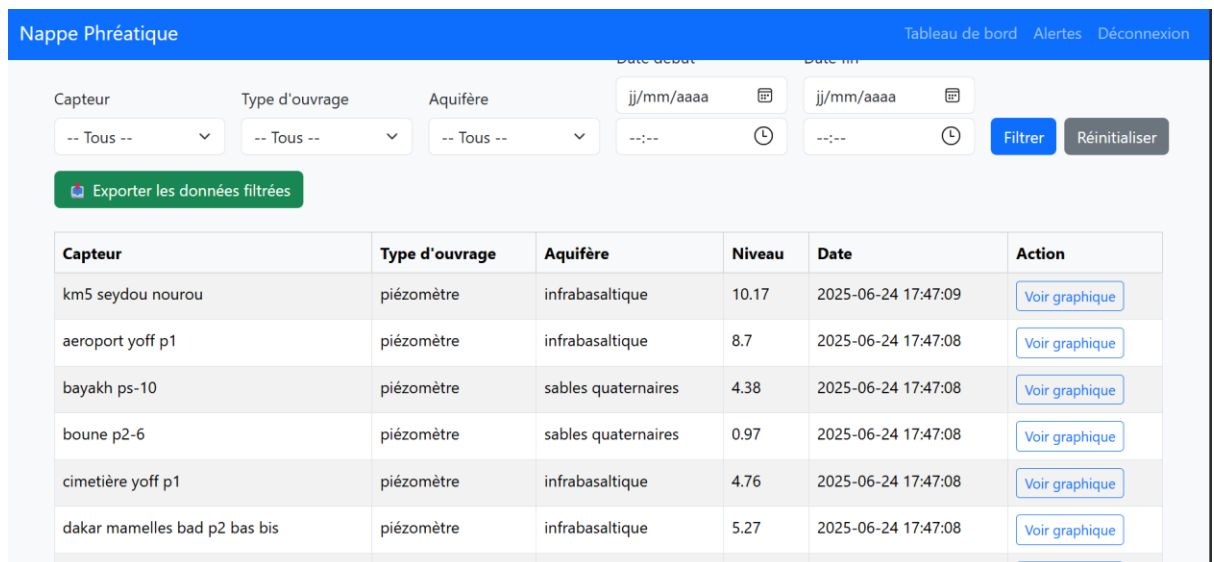


Figure 4.4 Dashboard de visualisation des mesures

- **Détection d'alertes** : Le système génère automatiquement des alertes lorsque certains seuils critiques sont atteints.

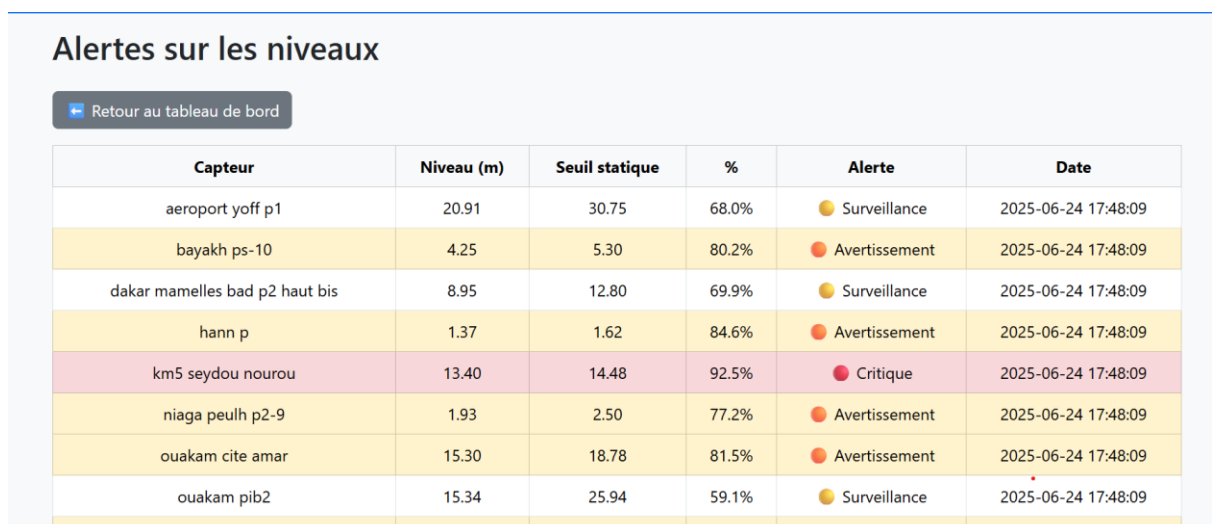


Figure 4.5 Dashboard de visualisation d'alertes

- **Filtrage et exportation** : L'interface permet de filtrer les données par date, capteur, zone ou type d'alerte, et de les exporter au format CSV.

```

capteur,"Type d'ouvrage",Aquifère,Niveau,Date
"aéroport yoff p1",piézomètre,infrabasaltique,13.14,"2025-06-24 17:49:09"
"bayakh ps-10",piézomètre,"sables quaternaires",0.13,"2025-06-24 17:49:09"
"boune p2-6",piézomètre,"sables quaternaires",0.81,"2025-06-24 17:49:09"
"cimetière yoff p1",piézomètre,infrabasaltique,7.01,"2025-06-24 17:49:09"
"dakar mamelles bad p2 bas bis",piézomètre,infrabasaltique,8.45,"2025-06-24 17:49:09"
"dakar mamelles bad p2 haut bis",piézomètre,infrabasaltique,1.55,"2025-06-24 17:49:09"
"gouye guewel p2-10",piézomètre,"sables quaternaires",6.48,"2025-06-24 17:49:09"
"hann p",piézomètre,infrabasaltique,0.61,"2025-06-24 17:49:09"
"km5 seydou nourou",piézomètre,infrabasaltique,7.86,"2025-06-24 17:49:09"
"niaga peulh p2-9",piézomètre,"sables quaternaires",1.02,"2025-06-24 17:49:09"
"ouakam cite amar",piézomètre,infrabasaltique,5.55,"2025-06-24 17:49:09"
"ouakam cité mbackyou faye bad 3",piézomètre,infrabasaltique,8.14,"2025-06-24 17:49:09"
"ouakam pib2",piézomètre,infrabasaltique,13.01,"2025-06-24 17:49:09"
"parcelles assainies pib3",piézomètre,infrabasaltique,3.86,"2025-06-24 17:49:09"
"sangalkam 3",piézomètre,"sables quaternaires",1.94,"2025-06-24 17:49:09"
"sangalkam ps 1-ii haut",piézomètre,"sables quaternaires",3.45,"2025-06-24 17:49:09"
"sangalkam ps1-i bas",piézomètre,"sables quaternaires",0.34,"2025-06-24 17:49:09"
"thiaroye/mer p3-1",piézomètre,"sables quaternaires",0.93,"2025-06-24 17:49:09"
"bayakh ps-11",piézomètre,"sables quaternaires",1.15,"2025-06-24 17:49:09"
"camberene p2-2 bis",piézomètre,"sables quaternaires",0.26,"2025-06-24 17:49:09"
"guediawaye p2-5",piézomètre,"sables quaternaires",4.53,"2025-06-24 17:49:09"
"boune p2-6",piézomètre,"sables quaternaires",0.59,"2025-06-24 17:49:09"
"sangalkam 3",piézomètre,"sables quaternaires",2.82,"2025-06-24 17:49:09"
"aéroport yoff p1",piézomètre,infrabasaltique,13.24,"2025-06-24 17:49:09"
"camberene p2-2 bis",piézomètre,"sables quaternaires",2.95,"2025-06-24 17:49:09"
"cimetiere yoff p1",piézomètre,infrabasaltique,10.04,"2025-06-24 17:49:09"
"dakar mamelles bad p2 bas bis",piézomètre,infrabasaltique,11.21,"2025-06-24 17:49:09"

```

Figure 4.6 Données exporter sous format CSV

- **Gestion des utilisateurs** : Chaque utilisateur n'accède qu'aux fonctionnalités spécifiques à son rôle :
 - L'Administrateur peut gérer les comptes, configurer les capteurs et consulter tous les historiques.

Figure 4.7 Dashboard de l'administrateur

- L'Agent ONAS, de la DA, de la DRA, du ministère de l'intérieur et du ministère de l'hydraulique ont un accès restreint aux alertes, limité aux zones d'intérêt et sans détail technique.

Alertes - Agent ONAS

Se déconnecter

Zone	Risque d'inondation (%)	Type d'alerte	Date
Boune	71.1%	● Avertissement	2025-06-24 17:49:09
cimetière yoff	71.3%	● Avertissement	2025-06-24 17:49:09
Mamelles	66.5%	● Surveillance	2025-06-24 17:49:09
Gouye guewel	98.2%	● Critique	2025-06-24 17:49:09
Ecole normale	54.3%	● Surveillance	2025-06-24 17:49:09
Ouakam Cité Mbockyou faye	66.1%	● Surveillance	2025-06-24 17:49:09
Cité Comico	50.2%	● Surveillance	2025-06-24 17:49:09
Sangalkam	68.8%	● Surveillance	2025-06-24 17:49:09
Sangalkam	98.9%	● Critique	2025-06-24 17:49:09

Figure 4.8 Dashboard de l'agent de l'ONAS

4.2 Intérêt de l'approche par simulation

Bien que la solution n'ait pas été testée avec des équipements réels, l'architecture fonctionnelle mise en place reproduit fidèlement les **comportements attendus d'un système IoT déployé** :

- Elle permet de valider le **flux complet de données**, de la collecte à l'exploitation.
- Elle offre une **base technique solide** pour un futur déploiement physique avec du matériel.
- Elle démontre que les technologies choisies (MQTT, Node-RED, MySQL, PHP) sont parfaitement **interopérables** et **adaptées au contexte local**.

Conclusion

Cette simulation a permis de démontrer la faisabilité technique du système, en s'affranchissant temporairement des contraintes matérielles. La solution proposée est modulaire, évolutive, et pourra être directement connectée à des capteurs physiques dans une version future. Elle constitue une **preuve de concept robuste**, conforme aux objectifs initiaux du projet, tout en répondant aux réalités économiques et techniques du terrain

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur la conception et la mise en œuvre d'un système intelligent de surveillance du niveau de la nappe phréatique à Dakar, dans un contexte marqué par la récurrence des inondations urbaines. L'étude a permis de mettre en évidence le rôle aggravant joué par la remontée des eaux souterraines, en lien avec la pluviométrie saisonnière, l'urbanisation incontrôlée et l'absence de dispositifs de suivi adaptés.

Après une analyse approfondie des caractéristiques hydrogéologiques de la région de Dakar, et des limites des méthodes traditionnelles de mesure, un état de l'art des technologies IoT a permis d'identifier les composants matériels et logiciels les plus appropriés à une solution locale, peu coûteuse, mais performante.

En dépit de contraintes financières ayant limité l'accès à l'équipement matériel, une approche par simulation complète a été réalisée : un script Python simule les capteurs, les données sont transmises via MQTT, puis traitées dans Node-RED, stockées dans une base MySQL puis visualisées via une interface web fonctionnelle.

Chaque acteur du système (Administrateur, DGPRE, ONAS) peut ainsi réaliser ses opérations via des interfaces spécifiques, avec alertes, filtrage, et exportation de données.

Cette preuve de concept a démontré la faisabilité technique, l'adaptabilité aux réalités locales, et la valeur stratégique d'un tel système dans le renforcement de la résilience urbaine face aux inondations. Le projet peut désormais servir de base concrète à un futur déploiement terrain, dès que les ressources matérielles seront disponibles.

Références

- [1] «Présentation de l'IFAN – Institut Fondamental d'Afrique Noire (IFAN) – Cheikh Anta DIOP,» [En ligne]. Available: <https://ifan.ucad.sn/presentation-de-lifan/>. [Accès le 30 Novembre 2024].
- [2] «IRD le Mag,» [En ligne]. Available: <https://lemag.ird.fr/fr/inondations-dakar-un-defi-pour-les-pouvoirs-publics>. [Accès le 14 Décembre 2024].
- [3] S. CHAOUI, *Hydrogéologie et Hydrochimie de la presqu'île du Cap-Vert (nappe infrabasaltique et nappe de Thiaroye) Sénégal*, Dakar: L'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, 1996.
- [4] A. T. THIAM, *Impact de l'augmentation des prélèvements sur le comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe infrabasaltique*, Dakar: Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2021.
- [5] N. K. S. Fall, *Diagnostic de la qualité et conséquences sanitaires de l'eau des mini forages équipés de pompes "Diambar" implanté dans la nappe de thiaroye*, Dakar: Université Cheikh Anta Diop, 2012.
- [6] M. I. OUEDRAGO, *Contribution à l'étude hydrodynamique de la nappe du littoral dans la banlieue de dakar*, Dakar: Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2009.
- [7] S. Cisse, *Evolution piezométrique et hydrochimique de la nappe infrabasaltique de la Presqu'île du cap vert après dix années de sécheresse*, Dakar: Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1993.
- [8] C. M. DIOP, *Etude de la contamination fécale de la nappe de Thiaroye dans le bassin urbanisé : Caractérisation lithostratigraphique du réservoir pour évaluer les facilités de transfert des polluants en terme hydraulique*, Dakar: Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2020.
- [9] A. BOUCHARREB, *Développement d'une architecture flexible pour la gestion et la sécurité des transactions et flux de données pour les objets connectés dans le contexte de la maison intelligente*, Québec: L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, 2023.
- [10] «Réseau 2G : Définition et produits compatibles,» [En ligne]. Available: <https://www.giga-concept.fr/technologies/reseau-2g/>. [Accès le 02 Février 2025].
- [11] «Pourquoi le Nb-IoT peut être une alternative sérieuse ? - Rtone,» [En ligne]. Available: <https://rtone.fr/blog/nb-iot/>. [Accès le 10 Février 2025].
- [12] M. F. Ball, *Conception et réalisation d'un système de monitoring de la qualité de l'eau basé sur l'IoT : cas du Lac de Guiers*, Dakar: Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar, 2023.
- [13] «Qu'est-ce qu'une plateforme IoT ? | DeepSea,» [En ligne]. Available: <https://www.deepseadev.com/en/blog/what-is-iot-platform/>. [Accès le Mars 2025].
- [14] «RG2i,» [En ligne]. Available: <https://www.rg2i.com/blog/reseau-lora-prive-ou-lorawan-public/>. [Accès le 14 janvier 2025].

Annexes

Annexe 1 : Choix des capteurs

Tableau 0.1 Tableau comparatif des capteurs

Critères	KEJUN 136	QDY30A
Plage de mesure (m)	0.5-500	0.5-500
Précision(FS)	0,5% ,0,2%	0,5% ,0,2%
Compatibilité matérielle	Arduino, ESP32	Arduino, ESP32
Tension d'alimentation	12-36VDC	12-36VDC
Coût approximatif (FCFA)	11954-24705	12833-26421
Indice d'étanchéité (IP)	IP68	IP68

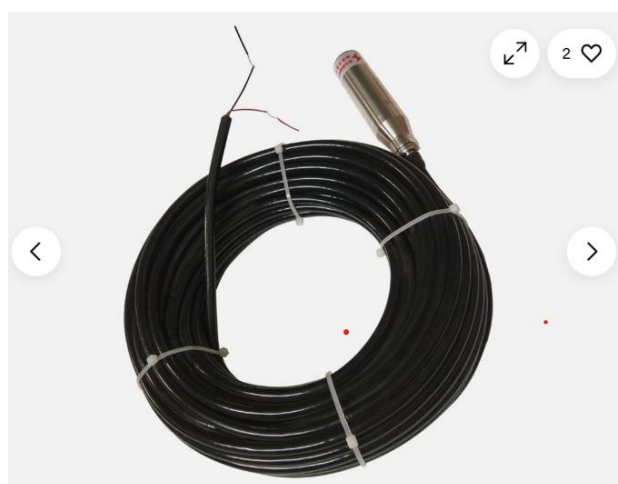


Figure 0.1 : Capteur KEJUN 136

Annexe 2 : Choix des microcontrôleurs

Tableau 0.2 Tableau comparatif des microcontrôleurs

Critère	Arduino Uno	ESP32
GPIO	14 numériques, 6 analogiques	30–36 GPIO, 18 ADC
Mémoire RAM	2 KB	520 KB SRAM
Mémoire Flash	32 KB	4 MB
Compatible avec module Lora	oui	Oui
Tension d'alimentation	5V	3.3V
Programmation	Très facile	Facile aussi
Prix(FCFA)	5000	13446



Figure 0.2 Microcontrôleur ESP32

Annexe 3 : Choix des modules lora

Tableau 0.3 Tableau comparatif des modules lora

Critère	Ra-02 (SX1278)	TTGO ESP32 LoRa v1 (SX1276)
Bande de fréquence	433 MHz	868 MHz
Sensibilité Réception (Rx)	-139 dBm	-148 dBm
Puissance émission (Tx)	jusqu'à 20 dBm	jusqu'à 20 dBm
Portée (urbain)	2–5 km	3–10 km
Arduino IDE compatible	Oui	Oui
Antenne externe (SMA)	Oui	Oui (incluse)
Prix estimé(FCFA)	1995	9820

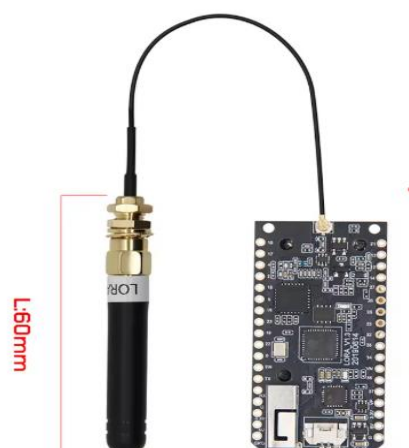


Figure 0.3 Module Lora TTGO ESP32 LoRa v1 (SX1276)

Annexe 4 : Choix des passerelles

Tableau 0.4 Comparaison des passerelles

Critère	RAK7249 Wis-Gate Edge	Dragino DLOS8N
Canaux	8 ou 16	8
Connexions	Ethernet, Wi-Fi, 4G	Ethernet, 4G (option)
Bande de fréquence	EU868	EU868
Étanchéité (IP)	IP67	IP67
Portée (Km)	5–10	3–6
Alimentation	12V DC ou PoE	12V DC
Prix estimé (FCFA)	228085-342413	183783-227799



Figure 0.4 Passerelle LoraWAN Dragino DLOS8N

Annexe 5 : Choix des plateformes IoT

Tableau 0.5 Comparaison des plateformes IoT

Critère	Node-red	ThingsBoard CE
Type	Outil de flux visuel (low-code)	Plateforme IoT complète
Installation	Très Facile	Moyennement facile
Protocoles supportés	MQTT, http, WebSocket, Modbus	MQTT, HTTP, CoAP, LwM2M
Traitement logique	Par blocs et fonctions JavaScript	Par moteur de règles ou scripts
Consommation de ressources	Faible (léger)	Moyenne à élevée

Annexe 6 : Choix des technologies de développement

Tableau 0.6 : Critères de comparaison des Stack de développement Web

Critères	PHP + MySQL + Bootstrap	Node.js + MongoDB + React/Tailwind
La facilité d'apprentissage	Très accessible	Courbe d'apprentissage plus complexe
la facilité d'hébergement	Très simple et économique	Nécessite VPS/cloud
la documentation	Très vaste	Très vaste
temps de développement	Réduit	Plus long
maintenance	Simple	Plus technique
l'intégration entre technologies	Nativement compatibles	Peut nécessiter des configurations



Figure 0.5 Stack de développement choisi

Annexe 7 : Paramètres de dimensionnement

Tableau 0.7 Paramètres de dimensionnement

Élément	Valeur
Surface à couvrir	538,38 km ²
Environnement	Urbaine/périurbain
Modèle de passerelle choisi	Dragino DLOS8N (LoRaWAN, 8 canaux, outdoor, 868 MHz)
Portée moyenne estimée (urbaine) : R	5 km
Taux d'efficacité de couverture : α	60 %

Annexe 8 : Calcul de budget

Tableau 0.8 Calcul de budget

Elément	quantité	Prix unitaire(FCFA)	Prix total(FCFA)
Capteur KEJUN136	35	11 954-24 705	864 675
TTGO ESP32 LoRa v1 (SX1276)	35	9820	343 700
Passerelle Dragino DLOS8N	4	183 783-227 799	911 196
Boîtier étanche IP65	35	1 255	42 875
Câbles,résistances, breadboard, connecteurs	forfait	Pas encore défini	
			Total = 2 162 446

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception d'un système intelligent de surveillance du niveau de la nappe phréatique à Dakar, une ville régulièrement confrontée aux inondations. Le projet vise à proposer une solution technologique innovante, peu coûteuse et adaptée au contexte local, en combinant des capteurs simulés, une transmission via MQTT, un traitement avec Node-RED, une base de données MySQL et une interface web.

Les objectifs de ce travail sont de permettre la collecte, la visualisation et l'exploitation efficace des données hydrologiques en temps réel, tout en assurant un accès différencié selon les profils d'utilisateurs (Administrateur, DGPRES, ONAS, DA, DRA, Ministère de l'intérieur, Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement). Faute de moyens matériels, une simulation a été mise en place pour valider l'ensemble du fonctionnement du système.

La méthodologie adoptée repose sur une étude du contexte hydrogéologique, une analyse des solutions IoT existantes, et une modélisation UML/SysML pour structurer l'architecture du système. Les résultats montrent la faisabilité de l'approche retenue et ouvrent la voie à un déploiement réel dès que les ressources seront disponibles.

Ce travail contribue au développement de solutions numériques pour la résilience urbaine face aux changements climatiques.

Mots clés : Surveillance, nappe phréatique, inondation, IoT, MQTT, Node-RED, base de données, système embarqué, alerte, Dakar

Abstract

This thesis focuses on the design of an intelligent groundwater level monitoring system in Dakar, a city frequently affected by urban flooding. The project aims to propose an innovative, low-cost technological solution adapted to the local context by combining simulated sensors, MQTT communication, Node-RED data processing, MySQL storage, and a web-based interface.

The main objectives are to enable real-time collection, visualization, and exploitation of hydrological data, with user-specific access rights (Administrator, DGPRES, ONAS, DA, DRA, Ministry of Water and Sanitation, Ministry of the Interior). Due to limited resources, a simulation-based approach was implemented to validate the system's overall operation.

The methodology includes a study of the hydrogeological context, a review of existing IoT-based solutions, and a SysML/UML modeling phase to design the system's architecture. The results demonstrate the feasibility of the proposed solution and provide a foundation for future physical deployment when resources allow.

This work contributes to the development of digital tools to strengthen urban resilience against the impacts of climate change.

Keywords: Monitoring, groundwater, flooding, IoT, MQTT, Node-RED, database, embedded system, alert, Dakar