Université SAAD DAHLAB-BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement

Mémoire de Master

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Thème

Conception d'un système de télégestion pour la surveillance d'un réservoir d'eau potable : cas du réservoir de Beni Tamou, wilaya de Blida

Présenté par :

DRIOUCH ABDELMOUMEN

MOUSSOUS HAMID

Devant le jury composé de :

M.BENSAFIA Djillali	**MCB**	U.Blida1	Président
M. HADDAD Ali	MCA	U.Blida1	Examinateur
Mme. TAIBI Sabrina	MCA	U.Blida1	Promotrice
Mme. OUARDI Amira		**ADE**	Co-Promotrice

Promotion 2024-2025

REMERCIEMENTS

Avant tout et au terme de ce travail, nous adressons nos remerciements à **ALLAH** Le Tout-Puissant pour la volonté et le courage qu'il nous a donné pour bien mener ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à *Mme.TAIBI*, notre promotrice, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés, et son soutien constant tout au long de ce travail. Sa disponibilité, sa patience et son exigence ont été des sources d'inspiration et de motivation pour mener à bien ce projet.

Nos remerciements s'adressent également à *Mme. OUARDI*, notre Co-promotrice, pour son accompagnement bienveillant, ses observations pertinentes et son implication dans le suivi de notre progression. Son regard critique nous a permis d'améliorer la qualité de notre travail.

Nous souhaitons également remercier M. Amara, automaticien de l'ADE, pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée dans les aspects techniques du projet. Sa compétence et sa générosité dans le partage de son savoir ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble du corps enseignant du Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement, pour la qualité de l'enseignement reçu tout au long de ma formation. Leur dévouement, leur rigueur scientifique et leur encadrement ont été essentiels à mon parcours académique.

Mes remerciements les plus sincères vont également à l'ADE (Algérienne Des Eaux) pour son accueil, son accompagnement et les données mises à ma disposition, qui ont été d'une grande utilité pour la réalisation de ce mémoire. Merci à tous les ingénieurs et techniciens pour leur disponibilité et leur collaboration.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos parents, pour leur soutien moral et matériel, leur patience et leur confiance inébranlable. Leur présence à nos côtés a été une force essentielle tout au long de notre parcours.

À toutes ces personnes, nous exprimons notre reconnaissance la plus profonde.

Dédicace

À mes parents,

Pour votre amour inépuisable, vos sacrifices silencieux et votre soutien sans condition. Vous avez été, à chaque étape de ce parcours, ma force tranquille et mon repêre le plus sũr. Cette rêussite est avant tout la votre.

À ma sœur et à mes frères,

Pour votre affection constanté, vos encouragements et votre présencé rassurante, dans lés moments de doute comme dans ceux de rêussite.

À mes amis les plus proches : Nadouu, Karim, Kawther, Sihem,

Pour votre loyauté, vos mots simples mais puissants, et votre indéfectible soutien tout au long dé ce projet.

Au "Gossip Gang": Yanis, Omar, et les autres

Pour les rires, les discussions inoubliables et la joie partagée. Vous avez été bien plus qu'un groupe d'amis : un cèrcle de légêreté, d'énergie et d'équilibre dans cette aventúre.

Aux doctorants: Dr. Aiche, Dr. Remmide, Dr. Ziraoui, Dr. Guelmouna.

Et à mon binôme,
Drioućh Abdelmoumen

MOUSSOUS Hamid

Résumé

L'eau potable constitue une ressource essentielle à la vie, dont la gestion rationnelle s'impose aujourd'hui comme un impératif stratégique, en particulier dans les régions soumises à une pression hydrique croissante, telles que la wilaya de Blida. Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en proposant la conception et la mise en œuvre d'un système de télégestion intelligent nommé « HydroX », destiné à la surveillance en temps réel du niveau et la température de l'eau au sein du réservoir principal de Béni Tamou. La solution développée repose sur les technologies de l'Internet des Objets (IoT), en combinant des capteurs de mesure, un microcontrôleur ESP32, et une interface utilisateur à double accès (application mobile et version web). L'objectif est de fournir une alternative légère, autonome et économiquement accessible aux systèmes SCADA conventionnels, souvent indisponibles ou non opérationnels dans certains contextes. Les résultats obtenus mettent en évidence la capacité du système HydroX à assurer une surveillance continue, précise et réactive. Son architecture simple et modulaire, ainsi que son faible coût, en font une solution adaptable aux infrastructures locales, contribuant ainsi à l'amélioration de la gestion des ressources en eau dans les zones à forte vulnérabilité hydrique.

Mots-clés : AEP, Télégestion, IoT, SCADA, Réservoir d'eau, Capteurs.

ملخص

تُعدّ المياه الصالحة للشرب مورداً أساسياً للحياة، وأصبح من الضروري اليوم إدارتها بشكل عقلاني باعتبار ذلك خياراً استراتيجياً، خصوصاً في المناطق التي تعاني من ضغط مائي متزايد، مثل ولاية البليدة. ويأتي هذا البحث في إطار هذه الإشكالية من خلال اقتراح تصميم وتنفيذ نظام "HydroX"، وهو نظام ذكي للتسيير عن بعد، يهدف إلى مراقبة مستوى المياه والحرارة داخل الخزان الرئيسي لبني تامو في الزمن الحقيقي .تعتمد الحلول المطورة على تقنيات إنترنت الأشياء(IoT) ، من خلال دمج حساسات قياس، ومتحكم دقيق من نوعESP32 ، وواجهة استخدام ثنائية الوصول (تطبيق على الهاتف المحمول ونسخة ويب). يهدف هذا النظام إلى توفير بديل خفيف، مستقل، وذي تكلفة منخفضة مقارنة بأنظمة SCADAالتقليدية، التي غالباً ما تكون غير متوفرة أو غير مفعّلة في بعض السياقات .وتُبرز النتائج المحصّلة فعالية نظام HydroX في تأمين مراقبة مستمرة، دقيقة وسريعة الاستجابة. كما أن بنيته البسيطة والمرنة، إضافة إلى تكلفته المنخفضة، تجعل منه حلاً قابلاً للتكيّف مع البُنى التحتية المحلية، مما يُساهم في تحسين إدارة الموارد المائية في المناطق ذات الهشاشة العالية من حيث التزود بالمياه.

الكلمات المفتاحية: ، التزويد بالماء الصالح للشرب، الإدارة عن بُعد، إنترنت الأشياء، نظام المراقبة والتحكم وجمع البيانات، خزان الماء، المستشعرات

Abstract

Drinking water is a vital resource for life, and its rational management has become a strategic imperative, particularly in regions experiencing increasing water stress, such as the wilaya of Blida. This thesis addresses this issue by proposing the design and implementation of an intelligent remote monitoring system named "HydroX," intended for real-time tracking of the water level and temperature within the main reservoir of Beni Tamou. The developed solution is based on Internet of Things (IoT) technologies, combining measurement sensors, an ESP32 microcontroller, and a dual-access user interface (mobile application and web version). The objective is to provide a lightweight, autonomous, and cost-effective alternative to conventional SCADA systems, which are often unavailable or non-operational in certain contexts. The results highlight the ability of the HydroX system to provide continuous, accurate, and responsive monitoring. It's simple and modular architecture, along with its low cost, makes it an adaptable solution for local infrastructure, contributing to improved water resource management in areas with high water vulnerability.

Keywords: AEP, remote management, IoT, SCADA, water reservoir, sensors

Table des matières

Introduction Générale 1

Chapitre I : Recherche bibliographique 1

Introduction.....3

1.1. Gestion des ressources en eau en Algérie.....3

1.1.1. Le contexte climatique et hydrographique de l'Algérie 3

1.1.2. Etat des ressources en eau en Algérie.....5

1.1.3. Organismes de gestion des ressources en eau en Algérie 8

1.2. Apport de la télégestion (dans le secteur de l'eau) pour une exploitation rationnelle des ressources en eau.....9

1.2.1. Définition de la télégestion.....9

1.2.2. Principes de la télégestion.....9

1.2.3. Fonctionnement de la télégestion.....10

1.2.4. Système de télégestion par IOT 11

1.2.4.1. Définition et caractéristiques de l'Internet des Objets 11

1.2.4.2. Applications de l'IoT pour la gestion des ressources en eau 14

Conclusion 16

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude 18

Introduction :.....18

2.1. Situation géographique 18

2.2 Situation hydrologique 19

2.3 Contexte climatique 20

2.4 Répartition des ressources en eau dans la wilaya de Blida 22

2.5 Population et besoins en eau de la wilaya de Blida 23

2.6 Infrastructure l'unité distribution de blida 26

2.7 Présentation du système de télégestion de la station de Beni Tamou 31

2.7.1 Architecture de la télégestion à Beni Tamou 32

2.7.1.1 Télégestion de la station de pompage.....32

2.7.1.2 Télégestion des forages 33

Conclusion 35

Chapitre 3 : Contribution du système de télégestion HydroX à la surveillance du Réservoir d'eau de Beni Tamou 18

Chapitre 3 :.....36

Contribution Du Système de télégestion HydroX à la Surveillance Du Réservoir D'Eau De Beni Tamou 36
Introduction 36
3.1. Présentation du système HydroX 36
3.1.1. Interfaces de la plateforme HydroX réalisée 36
3.1.2 Outils de développement multiplateforme 38
3.1.3 Hardware 40
Conclusion Générale 45
Références 46

Liste des abréviations

ESP32 : Microcontrôleur Wi-Fi/Bluetooth de la société Espressif

GEPH : Groupe Électropompe Horizontale

GEPI : Groupe Électropompe Immergé

GSM: Global System for Mobile Communications

IOT: Internet of things

LCD: Liquid Crystal Display

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition.

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1 : Les bassins versants en Algérie, (les chiffres représentent les bassins et leurs noms géographiques) 6
Figure 2: Barrage Beni Haroun 2023 7
Figure 3: Exemple du système de la télégestion 11
Figure 4 : Schéma représentatif de l'IOT 12
Figure 5:Agriculture connectée (MOKO Smart, IoT dans l'agriculture) 13

Chapitre II

Figure 6: localisation de la wilaya de Blida 19
Figure 7:situation géographique de la Mitidja 20
Figure 8: : variation des températures moyennes mensuelles interannuelle de Blida 21
Figure 9: Organigramme de l'unité de distribution de l'ADE 26
Figure 10 : Schéma Synoptique du système de distribution de Beni Tamou.....29
Figure 11: groupes électropompes horizontaux (GEPH).....29
Figure 12: groupes électropompes Immergé (GEPI).....30
Figure 13: Citerne pour Anti-Bélier 31
Figure 14: Capteur de niveau de réservoir station Beni Tamou (ne fonctionne pas) 32
Figure 15:Armoire de Télégestion de la station de pompage 33
Figure 16: : Armoire de Télégestion de Forage.....34

Chapitre III

Figure 17: HydroX 36
Figure 18: Interface de l'application mobile HydroX 37
Figure 19: Interface de HydroX version web.....38
Figure 20:Logo Dart 39
Figure 21: Logo du logiciel Flutter 39
Figure 22: Interface du logiciel Arduino IDE 40
Figure 23: Architecture du système HydroX 41
Figure 24:Niveau d'eau et température enregistrés par le système HydroX sur LCD 43
Figure 25: Niveau d'eau et température enregistrés sur l'application mobile HydroX.....43
Figure 26: Température enregistrée par la sonde piézométrique 44
Figure 27:Niveau d'eau maximal du réservoir.....44

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau 1 : Répartition des régions hydrographiques, superficies et bassins versants en Algérie…7

Chapitre II

Tableau 2 : La pluviométrie Mensuelle de la Wilaya de Blida (Station de Soumaa) (2011 - 2021) …24

Tableau 3 : Production d'eau par nature de la ressource…… ……25

Tableau 4 : ADE Population……26

Introduction Générale

L'eau potable est une ressource essentielle à la vie, mais elle devient de plus en plus rare et précieuse, notamment dans les régions où la disponibilité en eau est irrégulière ou soumise à des pressions démographiques et climatiques croissantes. En Algérie, la gestion des ressources hydriques représente un défi majeur, tant sur le plan technique qu'organisationnel. La nécessité de maîtriser les volumes disponibles, de réduire les pertes et d'assurer une distribution continue impose le recours à des solutions modernes de surveillance et de gestion.

Parmi ces solutions, les systèmes de télégestion et de supervision ont permis des avancées importantes dans le pilotage des infrastructures hydrauliques. Ils offrent la possibilité de contrôler à distance les installations, de suivre en temps réel les paramètres clés (niveaux, débits, pression, température), et d'alerter en cas de dysfonctionnements. En parallèle, l'émergence de l'**Internet des Objets (IoT)** et des **applications mobiles** ouvre de nouvelles perspectives pour développer des outils flexibles, accessibles, et facilement déployables sur le terrain.

Dans ce contexte, la **station de traitement d'eau potable de Béni Tamou**, située dans la wilaya de Blida, constitue un cas d'étude particulièrement pertinent. Bien que cette station soit déjà équipée d'un système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), ce dernier **n'est pas encore fonctionnel**, limitant la capacité des équipes locales à assurer un suivi réactif et précis des installations. Cette situation met en évidence le besoin d'une **solution mobile, légère et autonome**, capable d'assurer temporairement — voire durablement — la surveillance du réservoir principal.

Ainsi, notre travail a pour objectif de concevoir et de réaliser un **système mobile de suivi et de gestion d'un réservoir d'eau potable**, reposant sur des capteurs connectés et une application mobile intuitive. Le système proposé permet de :

- Mesurer en temps réel le niveau d'eau et la température à l'intérieur du réservoir ;
- Définir des seuils critiques personnalisables et générer des alertes automatiques ;
- Visualiser les données de manière claire à travers une interface mobile.

La démarche adoptée s'appuie sur des technologies open source, une architecture modulaire basée sur l'IoT, et une expérimentation en conditions réelles sur le site de Béni Tamou.

Notre étude permet de démontrer la faisabilité et la pertinence de l'implémentation de solutions embarquées basées sur l'IoT pour le suivi en temps réel des paramètres hydrauliques, en tant qu'alternative fonctionnelle et scalable aux systèmes SCADA non opérationnels ou absents.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le **premier chapitre** présente le cadre général de la gestion des ressources en eau en Algérie, les principes de la télégestion, et les apports des technologies IoT ;
- Le **deuxième chapitre** décrit la zone d'étude, en abordant les aspects géographiques, hydrauliques et climatiques de la région de Blida et de la station de Béni Tamou ;
- Le **troisième chapitre** est consacré à la conception, à la réalisation technique du système mobile, ainsi qu'à l'analyse des résultats obtenus à travers des essais pratiques.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Chapitre I : Recherche bibliographique

Introduction

En Algérie, les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines, qu'elles soient renouvelables ou non. Il convient de souligner que ces ressources sont très fluctuantes, en particulier celles qui sont issues des nappes tributaires des variations climatiques. La sécheresse hydrique, phénomène de plus en plus fréquent, aggrave cette variabilité et réduit considérablement la disponibilité en eau, mettant en péril l'équilibre entre l'offre et la demande. L'utilisation de ces ressources est extrêmement intense, en raison de la demande croissante. L'emploi de l'eau est associé aux activités économiques. Pour une gestion efficace, il est indispensable de bien connaître les ressources en eau. Ce chapitre met l'accent sur l'état des ressources en eaux et leur gestion en Algérie d'une part et présente les nouvelles techniques de gestion des ressources en eau en temps réel, d'autre part.

1.1. Gestion des ressources en eau en Algérie

1.1.1. Le contexte climatique et hydrographique de l'Algérie

L'Algérie, qui est le plus grand pays d'Afrique et de la Méditerranée, couvre une superficie de 2 383 741 Km². Cependant, 87% de cette étendue est occupée par le Sahara et le désert, ce qui représente 2 millions de Km². Les zones climatiques présentent une grande diversité et le climat passe d'un type méditerranéen à un type saharien. Les données météorologiques montrent un prononcé dégradé des précipitations du Nord vers le Sud et un autre, moins significatif, de l'Est vers l'Ouest. L'Algérie présente un territoire divisé en régions distinctes, présentant des différences marquées en termes de relief, de climat, de potentiel agricole et de ressources en eau et minérales. Les chaînes de montagnes de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien, situées à des distances variées de la côte, démarquent le nord humide du sud aride.

Les précipitations jouent un rôle essentiel dans la répartition des populations sédentaires en Algérie ainsi que dans le développement urbain. Elles permettent d'identifier trois grandes zones propices à l'urbanisation : le littoral, les plaines, et les hauts plateaux du Tell. Globalement

Le territoire algérien peut être divisé en quatre grandes zones bioclimatiques :

- La zone humide et sub-humide
- La zone semi-aride
- La zone aride ou steppique
- La zone saharienne

Concernant le découpage hydrographique, depuis 1996, l'Algérie est structurée en cinq grandes régions hydrographiques regroupant un total de 17 bassins versants (tableau 1). Le décret exécutif n° 96-100 du 6 mars 1996, qui définit les bassins hydrographiques et fixe le statut-type des établissements publics chargés de leur gestion, précise qu'un bassin hydrographique correspond à une surface topographique drainée par un cours d'eau principal et ses affluents, de manière à ce que toutes les eaux qui y naissent s'écoulent jusqu'à l'exutoire.

Chaque bassin est délimité par une ligne de partage des eaux qui suit généralement les reliefs. Les ressources en eau proviennent à la fois des eaux de surface et des nappes souterraines, qu'elles soient renouvelables ou non. [1]

Tableau 2 : Répartition des Régions Hydrographiques, Superficies et Bassins Versants en Algérie

Régions hydrographiques	Superficie en Km²	Bassins versants
Oranie-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais, Macta, Tafna, Chott Chergui, Côtiers Dahra
Cheliff–Zahrez	56 227	Cheliff, Chott Zahrez
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Côtiers algérois, Sébaou, Isser, Soummam, Chott Hodna
Constantinois-Seybousse-Mellegue	44 348	Côtiers constantinois, Kébir Rhumel, Medjerdah Mellegue, Seybousse, Hauts Plateaux, Constantinois
Sahara	2 018 054	Sahara, Chott Melghir

Le régime pluviométrique en Algérie se caractérise par une forte variabilité spatiale et temporelle, en lien direct avec la diversité des zones climatiques qui composent le pays. Le nord algérien, de type méditerranéen, enregistre les précipitations les plus importantes, avec des moyennes annuelles allant de 600 à 1 200 mm dans les zones littorales comme Tizi Ouzou ou Jijel, tandis que les Hauts Plateaux reçoivent entre 200 et 400 mm/an. En revanche, plus de 80 % du territoire national, correspondant aux régions sahariennes, reçoit moins de 100 mm de pluie par an, certaines zones hyperarides enregistrant même moins de 20 mm.

Depuis les années 1970, l'Algérie connaît une tendance significative à la baisse des précipitations, avec des réductions moyennes de 20 à 30 % dans plusieurs régions du nord, confirmées par des analyses statistiques (tests de Pettitt, Mann-Kendall). Ces diminutions ont un impact direct sur la recharge des nappes phréatiques, la disponibilité en eau pour l'agriculture, et la stabilité des écosystèmes locaux. Dans la plaine de la Mitidja par exemple, les effets du déficit pluviométrique se traduisent par un rabattement important du niveau piézométrique, compromettant à la fois l'alimentation en eau potable et les activités agricoles. [2]

1.1.2. Etat des ressources en eau en Algérie

L'Algérie septentrionale présente un climat semi-aride marqué par une forte irrégularité pluviométrique et une variabilité interannuelle des précipitations. L'Algérie compte 17 bassins versants (fig.1). De manière générale, les bassins versants sont imperméables, ce qui engendre une hydrologie caractérisée par une extrême irrégularité des écoulements, des crues violentes et rapides, ainsi qu'une érosion intense accompagnée de transports solides importants. Les ressources en eau, menacées par les activités humaines, industrielles et agricoles, et par le réchauffement climatique, sont devenues un enjeu majeur, auquel l'État algérien attache aujourd'hui une très grande importance. Toutefois, il faut admettre que les ressources en eau en Algérie sont limitées, vulnérables et inégalement réparties. Les potentialités hydriques naturelles du pays sont globalement estimées à 18 milliards de m3 /an réparties comme suit : 12,5 milliards de m3 /an dans les régions Nord dont 10 milliards en écoulements superficiels et 2,5 milliards en ressources souterraines (renouvelables). 5,5 milliards de m3 /an dans les régions sahariennes dont 0,5 milliard en écoulements superficiels et 5 milliards en ressources souterraines (nappes fossiles) [3]. L'inégale répartition des précipitations fait que les eaux de surface soient également mal réparties. Les zones littorales sont plus riches en eau que les zones semi arides et arides. De ce fait, l'Algérie par la force de la nature et de l'être humain, se trouve aujourd'hui confronté, à un problème de disponibilité en quantité et en qualité

suffisante. Aussi, il important de noter que, la Banque Mondiale classe l'Algérie dans la catégorie des pays « les plus pauvres en matière de potentialités hydriques », avec uniquement 11,5 milliards de m^3 d'eaux renouvelables par an, soit 292 m3 par personne, alors que la moyenne mondiale est de 600 m3 par personne. [1]

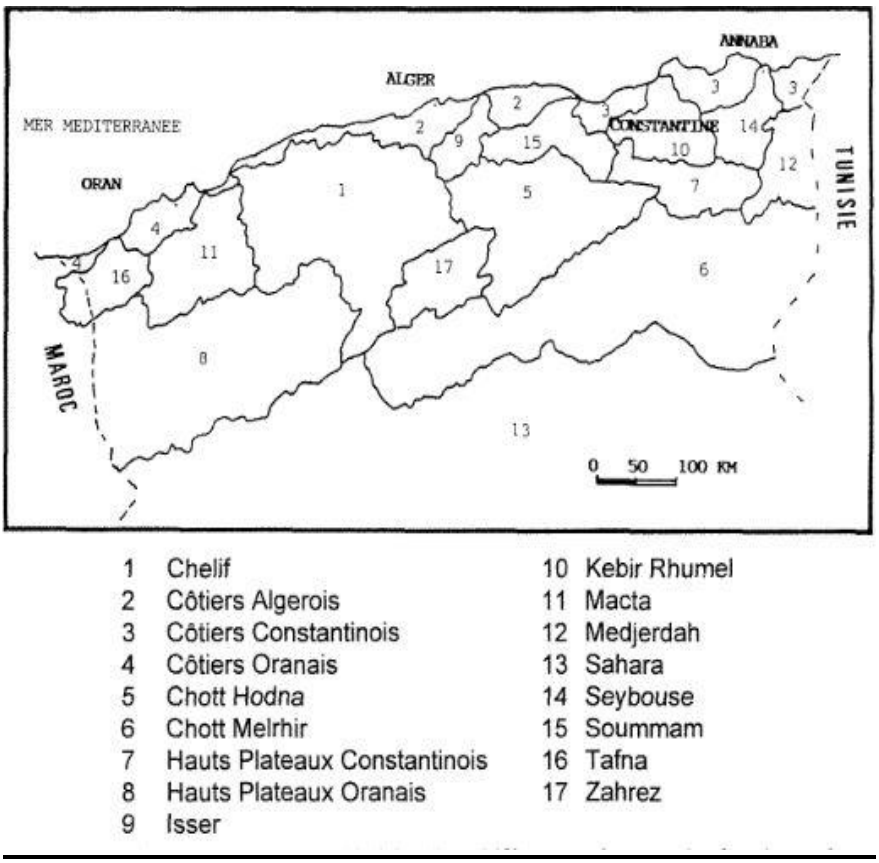

Figure 1 : Les bassins versants en Algérie, (les chiffres représentent les bassins et leurs noms géographiques) (ANRH)

Selon l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), les capacités de mobilisation des barrages en Algérie devraient atteindre près de 9 milliards de m^3, grâce à la mise en service de cinq nouveaux barrages, portant le total à 81 barrages opérationnels. Cette capacité, qui était de 8,3 milliards de m^3, devrait continuer d'augmenter pour atteindre 12 milliards de m^3 cubes d'ici 2030, afin de répondre aux besoins croissants en eau potable et au développement économique [1]

Figure 2: Barrage Beni Haroun 2023

Nous citons quelques grands barrages tel que :

- **Barrage de Beni Haroun** : alimente six wilayas de l'est du pays, sa capacité totale (de la cote 110 m à la cote 200 m) est de 963 hm³, répartie en : Volume actif : 727 hm³ et Volume mort : 240 hm³ [4]
- **Barrage de Taksebt** : essentiel pour les wilayas de Tizi Ouzou, Boumerdès et Alger. D'une capacité de stockage de 180 hm^3

Les eaux souterraines représentent une ressource essentielle en Algérie. Seules les eaux gravitaires, qui circulent dans les zones saturées du sous-sol, sont considérées comme mobilisables. Les nappes sont classées en trois types : libres, captives et semi-captives, et leur exploitation se fait par des puits et des forages. Leur potentiel est évalué par des tests de pompage et un suivi régulier de paramètres physico-chimiques.

Les réserves exploitables sont estimées à environ 1,256 milliard de m³ par an. En 1995, 0,849 milliard de m³ ont été prélevés, avec un objectif d'atteindre 1,180 milliard de m³ en 2010, soit une augmentation de 38 %. Un programme d'urgence prévoyant 2000 forages a été lancé pour répondre à la demande, avec une priorité donnée à l'usage de l'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable. [5]

Le grand aquifère saharien contient plus de 60 000 milliards de m³ d'eau, bien que son taux de renouvellement annuel ne dépasse pas 1 milliard de m³. Grâce à une coopération avec la Tunisie et la Libye, l'Algérie envisage de mobiliser 2,5 milliards de m³ de ressources en eau. [5]

1.1.3. Organismes de gestion des ressources en eau en Algérie

La gestion de l'eau conventionnelle est un enjeu majeur face à l'augmentation de la demande et aux effets du changement climatique. En Algérie, Plusieurs institutions sont impliquées dans cette gestion :

- **L'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH)** : chargée de l'inventaire et du suivi des ressources en eau. Elle a pour rôle :
  - Gestion et planification des ressources en eau
  - Surveillance et évaluation des ressources hydrauliques
  - Coordination et suivi des infrastructures hydrauliques
  - Appui technique et mise en œuvre des politiques
- **L'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT)** : responsable de la construction et de la gestion des barrages. Elle a pour rôle :
  - Conception, construction et gestion des barrages
  - Réalisation des projets de transfert d'eau
  - Maintenance et suivi technique des infrastructures de retenue et de transfert d'eau.
  - Contribution à la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable et pour l'agriculture
- **La Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger (SEAAL)** : chargée de la gestion de l'eau potable et de l'assainissement dans la région d'Alger et de Tipaza. Elle a pour rôle :
  - Production, distribution et gestion de l'eau potable
  - Collecte, traitement et évacuation des eaux usées
  - Maintenance et développement des infrastructures liées à l'eau potable et à l'assainissement.

- **L'Algérienne des Eaux (ADE)** : responsable de la distribution de l'eau potable à l'échelle nationale. Elle a pour rôle :
  - Gestion des abonnements et des contrats
  - Facturation et recouvrement
  - Production et distribution d'eau potable
  - Maintenance et interventions techniques
  - Réception et traitement des réclamations
  - Contrôle de la qualité de l'eau
  - Sensibilisation et économie d'eau

1.2. Apport de la télégestion (dans le secteur de l'eau) pour une exploitation rationnelle des ressources en eau

1.2.1. Définition de la télégestion

La télégestion est l'ensemble des dispositifs, qui associe l'électronique, l'informatique et les télécommunications pour permettre de contrôler à distance via un ordinateur, Smartphone ... et d'interagir avec des systèmes ou sites industriels à distance ou géographiquement isolés. Il s'agit d'un élément clé dans de nombreux domaines (industrie, eau, environnement, énergie, télécommunications, transport…). La télégestion permet également de surveiller des sites (installations, systèmes…), de transmettre des informations (données, historiques, pannes, fuites…) et de faire du pilotage à distance, par exemple déclencher des commandes sur des vannes distantes …). [6]

1.2.2. Principes de la télégestion

La télégestion nous permet de surveiller et piloter à distance des installations ou sites industriels éloignés. Elle se base sur plusieurs principes fondamentaux à savoir :

a) Acquisition des données : La télégestion implique la collecte de données à partir de capteurs, de dispositifs de mesure et d'autres sources d'informations. Ces données peuvent être liées à des paramètres tels que la température, la pression, le niveau, la consommation d'énergie, etc.

b) Traitement des données : Toutes les données sont stockées et archivées dans un journal (Bases de données). Les données sont horodatées et encryptées pour plus de sécurité selon le niveau de la confidentialité de l'application.

c) Transmission des données et communication : Les données collectées sont transmises à distance à l'aide de technologies de communication telles que les réseaux informatiques, serveur web embarqué, les réseaux à base de l'IoT, les réseaux sans fil, etc. Une communication fiable et sécurisée est essentielle pour établir une connexion entre les systèmes de télégestion et les dispositifs sur le terrain.

d) Surveillance et contrôle à distance : Une fois les données collectées, la télégestion permet la surveillance en temps réel des systèmes à distance. Cela permet aux opérateurs de détecter les problèmes, les éventuelles anomalies ou les conditions critiques, et d'intervenir rapidement si nécessaire dans le moment opportun. La télégestion permet également le contrôle à distance des dispositifs, en leur envoyant des commandes pour effectuer des actions spécifiques.

e) Analyse des données : Les données collectées par les systèmes de télégestion peuvent être analysées pour obtenir des informations précieuses. L'analyse des données permet de détecter des tendances, d'identifier des modèles, de prévoir des pannes, d'optimiser les performances, etc. Cela peut aider à prendre des décisions éclairées et à améliorer la gestion globale des systèmes en utilisant des techniques de prédiction.

1.2.3. Fonctionnement de la télégestion

La télégestion fonctionne en permettant la surveillance et le contrôle à distance d'installations techniques grâce à des capteurs, des automates programmables (PLC) et des systèmes de communication. Les capteurs installés sur le terrain mesurent en temps réel des données comme le niveau d'eau, la pression ou la température, puis les transmettent à un centre de supervision via des réseaux (GSM, 4G, Wi-Fi, fibre optique, etc.). Ces données sont affichées dans un logiciel de supervision appelé SCADA, qui permet aux opérateurs de surveiller l'état des équipements, de recevoir des alertes en cas d'anomalie et d'agir à distance, comme allumer une pompe ou fermer une vanne. Ce système optimise la gestion des ressources, réduit les interventions humaines sur site et améliore la réactivité face aux pannes ou aux situations critiques. [7]

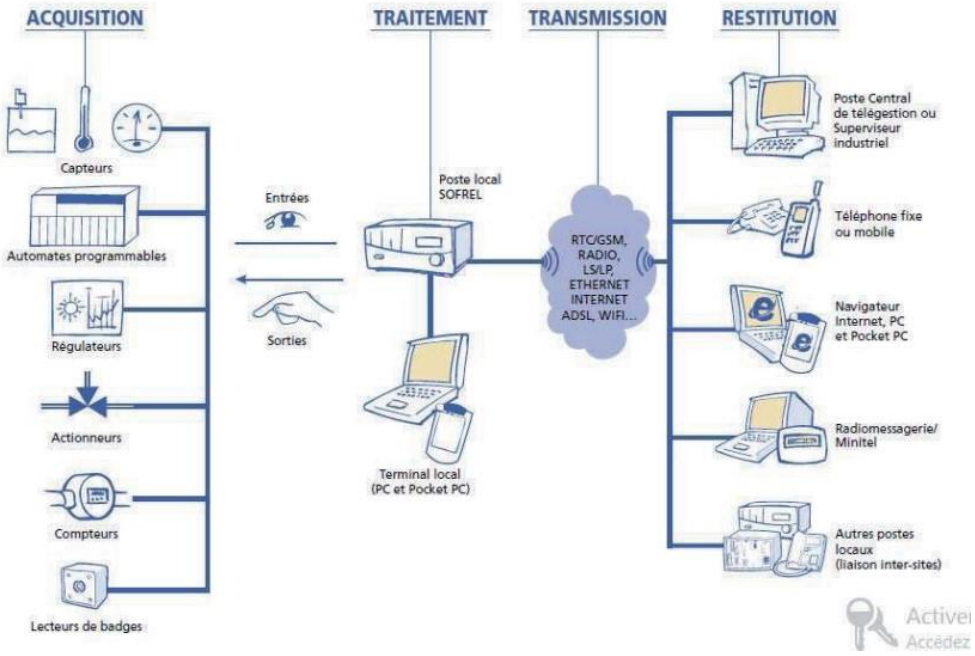

Figure 3: Exemple du système de la télégestion

1.2.4. Système de télégestion par IOT

1.2.4.1. Définition et caractéristiques de l'Internet des Objets

L'Internet des Objets (IoT), également connu sous le nom d'Internet of Things en anglais fait référence à la connexion d'objets matériels à Internet. Cela leur donne la capacité de rassembler, transmettre et recevoir des informations sans nécessiter une intervention humaine directe. Ces éléments peuvent comprendre des détecteurs, des appareils ménagers, des automobiles, du matériel médical et divers équipements industriels. [8]

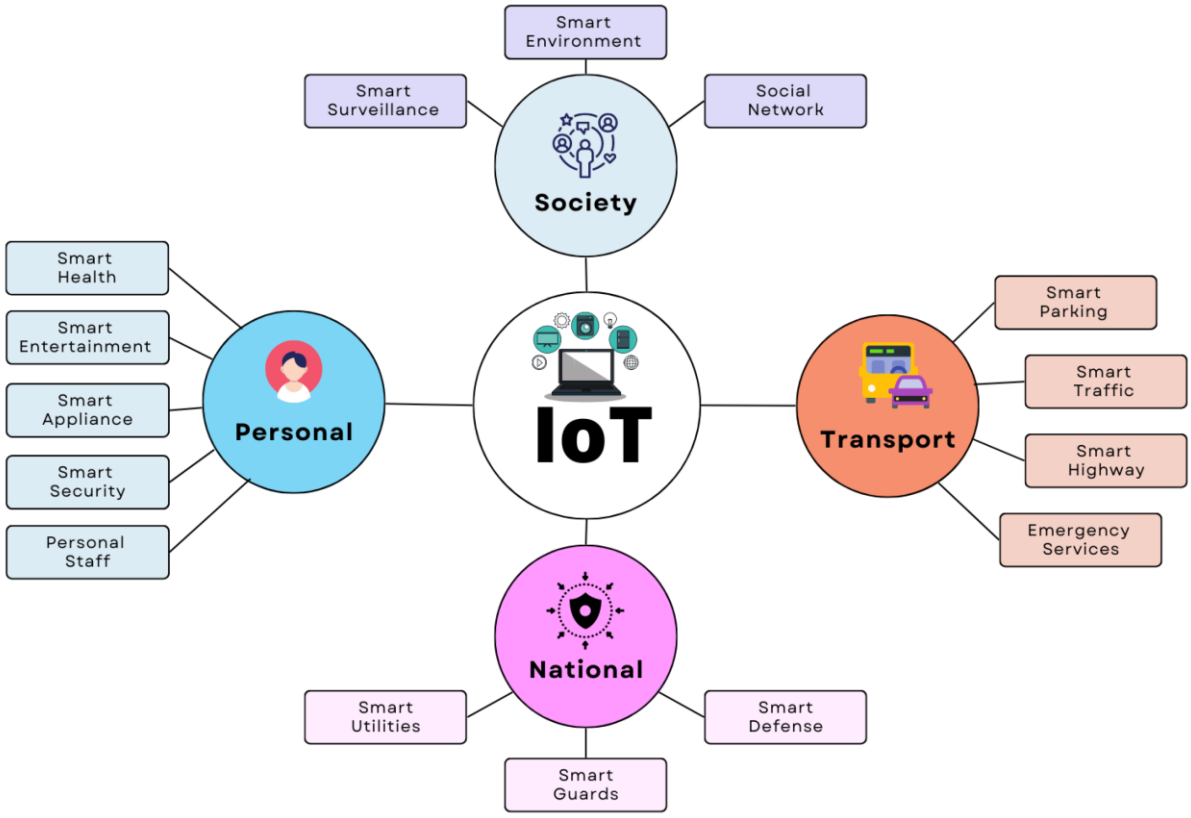

Figure 4 : Schéma représentatif de l'IOT

L'IOT est réputée pour les caractéristiques suivantes :

1. **Interconnexion** : Les dispositifs IoT se connectent à Internet à travers diverses technologies de communication telles que le Wi-Fi, la 5G, le Bluetooth, le RFID ou même les réseaux LPWAN (Low Power Wide Area Network).
2. **Capteurs et actionneurs** : Les capteurs permettent de collecter des données environnementales (température, humidité, mouvement, etc.), tandis que les actionneurs exécutent des commandes en fonction des informations reçues.
3. **Traitement et analyse des données** : Les données collectées sont analysées soit localement via des microcontrôleurs, soit envoyées vers des serveurs distants (cloud) pour un traitement avancé à l'aide d'intelligence artificielle ou de big data.
4. **Automatisation et prise de décision** : Grâce à des algorithmes, l'IoT permet d'automatiser des processus, d'améliorer l'efficacité et d'optimiser la consommation des ressources.

L'IOT peut s'appliquer à différents domaines :

- **Domestique** : Maisons intelligentes avec éclairage automatisé, thermostats connectés (ex. Nest), systèmes de sécurité intelligents.
- **Santé et bien-être** : Montres connectées pour suivre la fréquence cardiaque, dispositifs médicaux à distance pour surveiller les patients.
- **Industrie 4.0** : Capteurs sur les machines pour la maintenance prédictive, optimisation des processus de production.
- **Transports intelligents** : Véhicules autonomes, gestion du trafic en temps réel, optimisation des itinéraires grâce aux données GPS.
- **Agriculture connectée** : Surveillance des cultures et du bétail grâce à des capteurs d'humidité, de température et de nutrition du sol. [9]

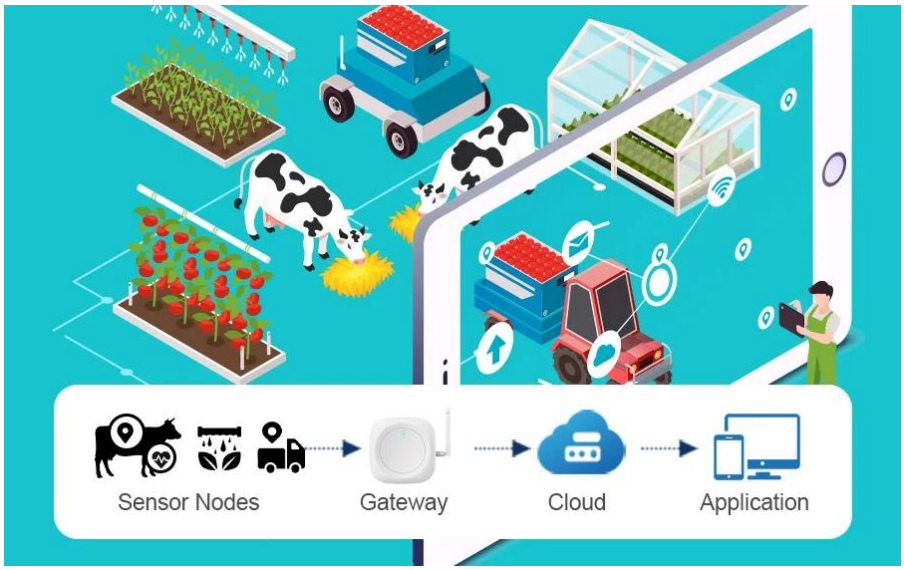

Figure 5:Agriculture connectée (MOKO Smart, IoT dans l'agriculture)

De par ses multiples avantages, l'IOT fait face aux défis suivants :

1. **Sécurité et confidentialité** : Les objets connectés sont vulnérables aux cyberattaques et posent des questions sur la protection des données personnelles.
2. **Interopérabilité** : L'absence de normes universelles complique l'intégration et la communication entre les dispositifs IoT de différents fabricants.

3. **Gestion des données** : La quantité massive de données générées nécessite des infrastructures performantes et des solutions efficaces de stockage et d'analyse.
4. **Consommation énergétique** : Les dispositifs IoT doivent être optimisés pour fonctionner avec une faible consommation d'énergie, en particulier pour les capteurs autonomes.

1.2.4.2. Applications de l'IoT pour la gestion des ressources en eau

L'IoT joue un rôle essentiel dans la gestion efficace de l'eau, offrant des solutions innovantes pour surveiller et optimiser notre consommation.

- **Capteurs d'eau :**

Ces dispositifs détectent les fuites avec précision en identifiant les anomalies de flux et en signalant les fuites potentielles avant qu'elles ne causent des dommages importants. Ils mesurent également la consommation en temps réel, fournissant aux utilisateurs des données détaillées pour une gestion plus responsable de l'eau.

- **Surveillance et gestion des infrastructures hydrauliques :**

Systèmes SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) : Ils offrent une supervision en direct du réseau de distribution d'eau.

Capteurs intelligents : Ils identifient les pertes et les diminutions de pression dans les tuyaux, permettant ainsi une action rapide.

Simulation des débits d'eau : Usage de programmes informatiques pour affiner la distribution des ressources en fonction de la demande.

- **Systèmes d'irrigation connectés :**

Les systèmes d'irrigation automatisés utilisent des capteurs pour déterminer le moment optimal pour arroser les plantes, garantissant un apport en eau adéquat tout en évitant le gaspillage. La programmation à distance via des applications mobiles permet aux utilisateurs de contrôler l'arrosage, même à distance, assurant ainsi une gestion efficace de l'eau dans les jardins et les espaces verts.

- **Dispositifs de surveillance de la qualité de l'eau :**

Des capteurs connectés surveillent en temps réel la qualité de l'eau, détectant les contaminants et assurant ainsi la sécurité de l'eau consommée. Ces dispositifs permettent une réaction rapide en cas de détection de substances nocives, protégeant ainsi la santé des utilisateurs.

- **Gestion urbaine de l'eau avec des objets connectés :**

Dans les environnements urbains, les objets connectés facilitent une gestion plus efficace des ressources en eau. Ils permettent de surveiller les réseaux de distribution, de détecter les fuites et d'optimiser l'utilisation de l'eau dans les infrastructures publiques, contribuant ainsi à une utilisation plus durable de cette ressource précieuse. En intégrant ces technologies, il est possible de réduire significativement le gaspillage d'eau et de promouvoir une utilisation plus durable des ressources hydriques [10].

Afin de concevoir un système efficace de gestion intelligente de l'eau, plusieurs travaux de recherche récents ont proposé des solutions innovantes s'appuyant principalement sur les technologies embarquées et les plateformes IoT. Les récents travaux dans le domaine de la gestion intelligente de l'eau mettent en avant des systèmes embarqués intégrant des microcontrôleurs Arduino, des capteurs ultrasoniques, des écrans LCD, des modules Bluetooth et des relais. Ces dispositifs permettent une mesure continue du niveau d'eau dans les réservoirs, avec déclenchement automatique de pompes selon des seuils configurés. L'objectif principal est d'automatiser la gestion de l'eau tout en réduisant les interventions humaines. Ces systèmes, bien que localement autonomes, offrent aussi des perspectives intéressantes d'intégration à des plateformes IoT pour une supervision centralisée et à distance [11].

Un autre système repose sur la surveillance simultanée du niveau d'eau et de l'humidité du sol à l'aide de capteurs connectés à Arduino. Les données sont transmises à une application Android via la plateforme Blynk. Lorsque le sol est sec ou que certains niveaux sont atteints, l'irrigation est automatiquement déclenchée ou l'eau est transférée entre réservoirs. Cette approche favorise une meilleure gestion des ressources hydriques, limite les pertes, prévient l'érosion et contribue à une utilisation efficace des eaux pluviales. [12]

Une revue de la littérature scientifique a analysé plus de 60 publications sur les systèmes de gestion intelligente de l'eau. Elle identifie des tendances dominantes comme l'adoption des compteurs intelligents, le développement d'architectures modulaires et la mise en place de

systèmes de détection de pertes. Cette étude met en lumière l'importance croissante des technologies IoT et des réseaux intelligents dans les services publics, notamment pour améliorer l'efficacité, la résilience et l'implication des usagers. [13]

Un autre système décrit l'usage de l'Arduino pour réduire les pertes d'eau dans les réseaux de distribution. Il s'appuie sur des capteurs capables de détecter les fuites et de surveiller les niveaux en temps réel. Cette approche, économique et accessible, permet une gestion proactive et automatisée, en particulier adaptée aux régions confrontées à des pénuries hydriques. [14]

Enfin, des systèmes plus avancés proposent des plateformes IoT intégrant divers capteurs pour surveiller la pression, la qualité de l'eau (notamment le pH), les niveaux et les fuites. Ce type de réseau permet une prise de décision intelligente, optimise la distribution de l'eau, garantit sa potabilité, réduit les coûts opérationnels et améliore l'efficacité énergétique globale. [15]

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière les grands enjeux liés à la ressource en eau en Algérie, un pays confronté à un stress hydrique structurel aggravé par la croissance démographique, l'urbanisation et les changements climatiques. Dans des régions comme Blida, la tension entre une ressource fragile et une demande croissante exige des solutions innovantes. Les technologies IoT émergent comme une piste prometteuse pour optimiser la gestion des ressources en eau (détection des fuites, irrigation intelligente), mais leur déploiement doit s'inscrire dans une approche systémique, combinant investissements durables, modernisation des infrastructures (barrages, réseaux) et gouvernance renforcée.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Chapitre 02 : présentation de la zone d'étude

Introduction :

Le présent chapitre a pour objectif de présenter la zone d'étude de Blida, et de la station de l'ADE de Beni Tamou, qui assure l'alimentation en eau potable de la région. Dans le cadre de l'amélioration de la gestion des ressources en eau, une attention particulière est portée à la surveillance et au contrôle des niveaux des réservoirs d'eau. Cette gestion repose sur un système de télégestion, permettant de suivre en temps réel les paramètres hydrauliques essentiels (niveau, débit, pression, etc.) et d'optimiser le fonctionnement des installations. Dans ce chapitre, nous décrirons d'abord les caractéristiques générales de la zone d'étude, puis nous présenterons les méthodes de gestion appliquées à travers le système de télégestion, en mettant en évidence ses avantages en termes de performance, d'économie d'eau et de réactivité opérationnelle.

2.1. Situation géographique

La wilaya de Blida est située dans le nord de l'Algérie, au pied de l'Atlas tellien et au centre de la plaine de la Mitidja.de Superficie de **: 1.479 Km^2** [16]**.**Voici quelques points clés concernant sa situation géographique :

- **Région** : Nord de l'Algérie, partie centrale du Tell.
- **Latitude / Longitude** : Environ 36.47° N, 2.83° E.
- **Limitrophe** :
    - Au nord : Wilaya d'Alger et Tipaza.
    - À l'ouest : Wilaya de Aïn Defla.
    - À l'est : Wilaya de Boumerdès.
    - Au sud : Wilaya de Médéa.

Figure 6: localisation de la wilaya de Blida

2.2 Situation hydrologique

Le territoire de la wilaya de Blida est structuré, selon les données de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), en cinq sous-bassins versants distincts. Ces sous-bassins sont rattachés à deux grands ensembles hydrologiques majeurs :

-Le bassin versant du Mazafran : Ce bassin occupe une position stratégique, s'étendant géographiquement depuis la région d'Ahmeur El Ain à l'est, jusqu'à El Affroun à l'ouest, en passant par la zone centrale de Bouinan. Cette vaste étendue couvre une superficie globale de 1 912 kilomètres carrés, caractérisée par une diversité topographique et hydrologique significative. De plus, le bassin versant du Mazafran n'est pas uniforme ; il est subdivisé en trois sous-bassins versants, chacun contribuant de manière spécifique au réseau hydrique de la région. Cette organisation permet une gestion optimisée des ressources en eau, tout en tenant compte des particularités géographiques et climatiques de chaque sous bassin

-Le bassin versant d'El Harrach : Le bassin versant d'El Harrach s'étend sur un territoire couvrant une superficie de 1 207 km², s'étirant géographiquement de Bouinan jusqu'à Meftah. Il est délimité au nord par la région du Sahel et les côtes maritimes, tandis qu'au sud, il est bordé par les montagnes de l'Atlas.

La wilaya de **Blida** fait partie intégrante de la **nappe de la Mitidja**, l'une des plus importantes réserves d'eau souterraine en Algérie. Située au cœur de la plaine de la Mitidja, Blida bénéficie de cette nappe pour l'irrigation de ses terres agricoles, l'approvisionnement en eau potable et le développement de ses activités industrielles. La qualité et l'abondance de cette ressource hydrique contribuent à la prospérité agricole de la région, notamment dans les cultures d'agrumes et de maraîchage [1].

La plaine de la Mitidja descend en pente douce du sud au nord, de l'Atlas vers les collines. Cinquante mètres seulement entre Ahmeur-el-Ain et le fond du lac Halloula.

De l'extrémité ouest d'Alger, sur 70 km, la plaine ne communique avec la mer que par l'intermédiaire de l'oued Nador et 40 km plus loin par le Mazafran.

Comme le présente la carte ci-dessous on peut définir quelques éléments délimitant la plaine de la Mitidja partant du Sud vers le Nord.

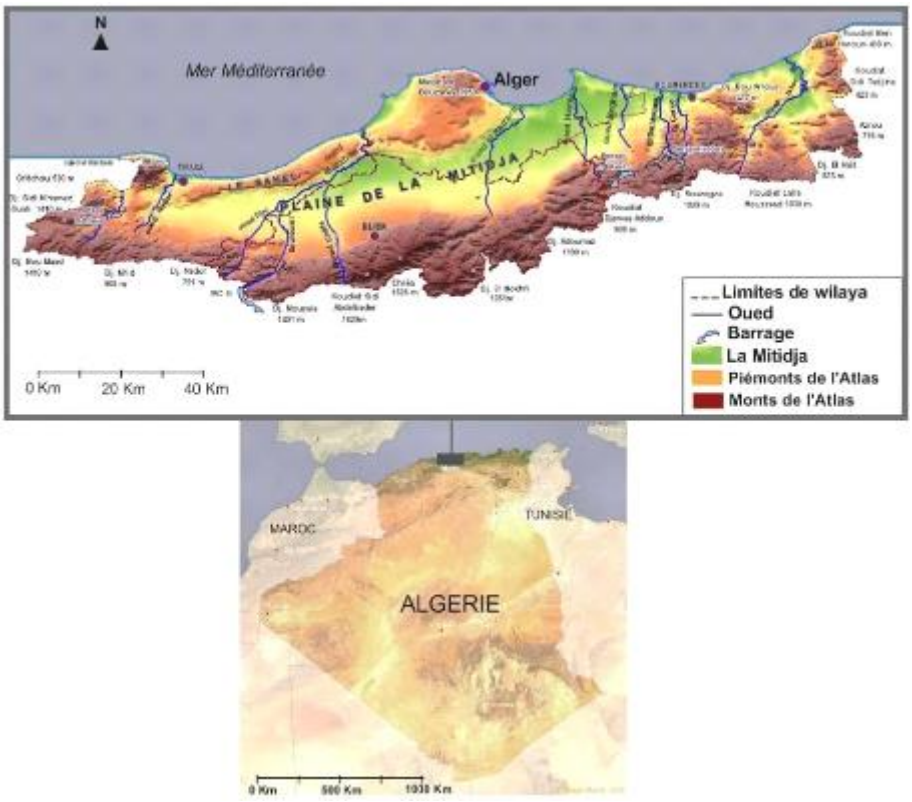

Figure 7:situation géographique de la Mitidja

2.3 Contexte climatique

Le climat de **Blida** présente des variations saisonnières marquées (chaud et tempéré). Selon la classification de Köppen et Geiger, le climat est de type **Csa** (climat méditerranéen avec été chaud). Au printemps (de mars à mai), les températures sont douces, oscillant entre **15°C et**

20°C, et les paysages verdissent avec les premières floraisons. L'été (de juin à septembre) est chaud et sec, avec des températures pouvant atteindre **35°C** lors des vagues de chaleur. En automne (d'octobre à novembre), les températures commencent à baisser progressivement et les premières pluies apparaissent. L'hiver (de décembre à février) est généralement doux mais pluvieux, avec des températures qui descendent rarement en dessous de **5°C**. La neige est rare, mais elle peut tomber sur les montagnes environnantes de l'Atlas.

Les précipitations sont principalement concentrées entre **novembre et mars**, ce qui favorise la verdure de la région, en particulier dans les zones montagneuses. Les mois d'été sont quant à eux quasiment secs, caractéristique typique du climat méditerranéen. Blida connaît également un taux d'humidité modéré, surtout en hiver, et des vents doux, bien qu'elle puisse parfois être affectée par le **Sirocco**, un vent chaud et sec en provenance du Sahara.

Grâce à ce climat, Blida dispose de conditions idéales pour l'agriculture, notamment pour la culture des **agrumes**, des **oliviers** et des **vignes**. Les plaines fertiles de la Mitidja, associées à la disponibilité en eau provenant des rivières locales et de la nappe phréatique de la Mitidja, soutiennent une activité agricole prospère. [17]

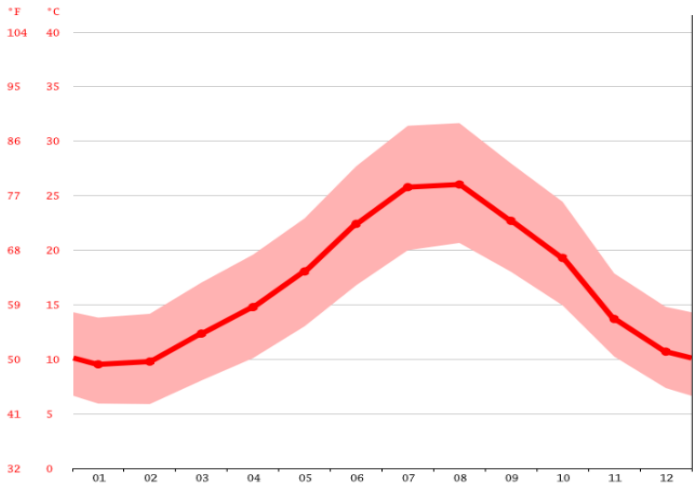

Figure 8: : variation des températures moyennes mensuelles interannuelle de Blida

La pluviométrie à Blida connaît des variations importantes d'une année à l'autre, influencée par les conditions climatiques régionales. Le tableau que suivant présente les précipitations mensuelles (en mm) enregistrées dans la Wilaya de Blida (soumaa station) sur une période de 11 ans, de 2011 à 2021

Tableau 2 : la Pluviométrie Mensuelle de la Wilaya de Blida (Station de soumaa) (2011 - 2021) *[1]*

Anneé/mois	Sep	oct	nov	dec	Jan	fev	Mars	avr	Mai	Juin	jui	Aout	Annuel (mm)
2011	19.6	82	78.5	68.6	48	240.7	122	112.4	15.9	0.2	0	40.8	828.7
2012	4.6	50.4	77.6	31.9	125.3	141.5	81	90	217.7	1.2	0	31.1	852.3
2013	9.6	36.8	181.6	165	67.8	77.4	155.4	2	11.3	74.7	0	0	781.6
2014	45.6	17.5	78.9	196	152.6	112.2	96.9	0	19.5	6.7	0.2	0	726.4
2015	26.7	66.4	77.8	0	139.9	132.8	156.8	73.8	59.4	0.3	2	0	735.9
2016	11.9	9.7	90.2	119	316.4	23.5	49.5	34.1	8.4	11.3	0.6	3.6	678.2
2017	54.3	25.1	144.4	159	20.3	104.7	97.5	177.2	70.7	67.7	0	0	920.5
2018	33.6	95.4	144.2	80.7	129	16.3	54.8	47.4	51.6	8.2	4.8	3	669
2019	35.7	22.7	117.1	18.8	17.8	0	93.2	132.2	69.5	8.5	0	22.5	538
2020	17.5	56.8	36.5	107	35.9	12.2	111.1	34.8	37.1	0	6.6	3.2	458.8
2021	16.7	38.7	353.1	54.6	13.9	25.9	102.1	148.1	69.2	0	0	0	822.3

Les précipitations annuelles varient considérablement d'une année à l'autre. Le maximum a été enregistré en **2017** avec **920.5 mm**, tandis que le minimum a été observé en **2020** avec seulement **458.8 mm**. Les mois les plus pluvieux, en moyenne, sont **novembre**, **décembre**, et **janvier**, ce qui correspond à la saison hivernale en Algérie.

Les mois les plus secs sont généralement **juillet** et **août**, avec parfois **0 mm** de précipitations.

La pluviométrie à Blida est influencée par les saisons et les variations climatiques. Les hivers sont humides et les étés sont extrêmement secs, ce qui est typique du climat méditerranéen. Les données montrent également des irrégularités marquées, ce qui pourrait être le signe de changements climatiques ou de phénomènes météorologiques exceptionnels.

2.4 Répartition des ressources en eau dans la wilaya de Blida

L'approvisionnement en eau potable de la wilaya de Blida est assuré grâce aux :

- **Eaux souterraines** : La wilaya de Blida dépend essentiellement de l'exploitation des eaux souterraines, avec un pourcentage de 71%, grâce à ses 432 forages disséminés sur l'ensemble du territoire de la wilaya, Avec une production actuelle de 125687 m3/j

- **Eaux superficielles** : L'approvisionnement en eau de la wilaya est également soutenu par les eaux superficielles qui proviennent [18] :
- Du captage des sources.
- D'un quota alloué à partir de **SP3 (SEAAL)** avec une production de **51 305 m³/j** (soit **29%** de la production totale).

Les sources d'eaux superficielles sont les suivantes :

- **SP3** : qui alimente Blida, Bouarfa, Ouled Yaich, Béni Mered, Guerrouaou, Soumaa, Béni Tamou.
- **Oued Sidi El Kebir**: Oued Blat (Blida, Bouarfa).
- **Oued Ben Achour**: Ouled Yaich.
- **Oued Chiffa** : Blida, Bouarfa, Chiffa.
- **Oued Sidi Aissa** : Guerrouaou.
- **Oued Chelay** : Bouinan.
- **Source Ain El Kseb** : Bougara.
- **Sources Boumakhlouf, Djemaa** : Souhane.
- **Sources Kerach, Tala Izide** : Chrèa.
- **Oued Bouchemla** : Soumaa.
- **Sources Ain Romana** : Ain Romana.
- **Oued Magtaa Lazreg**: Hamam Melouan, Bougara, Ouled Slama, Larabaa, Bouinan, Chebli.
- **Oued Sidi Hammouda**: Bougara, Ouled Slama. [19]

Tableau 3 : Production d'eau par nature de la ressource *[19]*

Nature de la ressource	Volume produit (m3)	%
Eaux souterraines	3 896 289	71%
Eaux de surfaces	1 590 455	29%
Production totale	5 486 744	100%

2.5 Population et besoins en eau de la wilaya de Blida

La wilaya de Blida s'étend sur une superficie de **1479 km²**. Elle est divisée en **10 daïras** regroupant **25 communes** pour une population totale de **1 652 000 habitants.**

Le Chef-lieu de Wilaya comprend 205 911 habitants, soit 12 % de la population totale.

Zones éparsés : 33 049 hab. soit 02 % de la population totale. [18]

Tableau 4 : ADE Population

Désignation	Situation actuelle
Nombre de communes de la wilaya	25
Nombre de communes gérées au détail (ADE)	25
Population desservie au détails (ADE) (Habitants)	1 641 049

En 2017, les besoins en eau de la wilaya étaient de 3361.70 hm^3 dont 67.89% ont été satisfaits.

Par type d'affectation de l'eau, la situation se présente ainsi :

- En matière d'eau potable, l'importance des centres urbains et la forte croissance démographique impliquent une forte mobilisation et consommation en eau. Dans ce cadre 118 Hm^3 d'AEP ont été mobilisés en 2017.
- Concernant l'eau agricole, la caractéristique majeure de la wilaya est la disponibilité en terres irrigables, ce qui induit des besoins annuels croissants. Les besoins de l'agriculture pour 2017 (168 hm^3) ne sont satisfaits qu'à 16.9 %.
- Pour ce qui est de l'eau destinée au secteur industriel, les besoins qui sont moins importants que pour les deux précédents secteurs (16 hm^3), sont satisfaits en 2017 à 14.5% [20]

Le réseau de distribution de l'eau potable de la wilaya de Blida est composé des infrastructures suivantes :

• **Stations de pompage** : Des installations réparties à divers emplacements garantissent la diffusion de l'eau dans les différents secteurs.

• **Réservoirs de stockage** : Ils ont pour fonction de gérer l'approvisionnement en Période de forte demande.

• **Canalisations** : Un large réseau souterrain achemine l'eau vers les usagers.

Toutefois, la wilaya de Blida connaît régulièrement des coupures d'approvisionnement, principalement à cause de :

- **Sècheresse et fluctuation des précipitations** : La continuité de la sécheresse a un impact sur la disponibilité des ressources aquatiques.
- **Accroissement de la consommation** : L'urbanisation et l'expansion industrielle augmentent la requête en eau.
- **Glissement entre l'offre et la demande** : Surtout pendant l'été, la demande excède fréquemment la capacité d'approvisionnement.

Parfois, Blida est confrontée à des problèmes de pollution de l'eau potable, associés à :

- **Contamination des nappes phréatiques** : due à l'agriculture et aux rejets industriels La qualité des eaux souterraines peut être influencée par les actions humaines.
- **Intrusion dans les conduits défectueux** : Les fuites et les casses de conduites peuvent provoquer des contaminations.
- **Insuffisance de traitement dans certaines stations** : Les infrastructures de traitement dépassées ou inadéquates peuvent ne pas assurer une qualité d'eau optimale.

Face aux défis croissants liés à la gestion de l'eau dans la wilaya de Blida, plusieurs solutions et stratégies ont été mises en œuvre pour assurer une distribution efficace et durable. La première étape consiste en la **modernisation des infrastructures vieillissantes**. Le renouvellement progressif des conduites anciennes permet de réduire significativement les fuites d'eau, qui représentent une part importante des pertes dans le réseau de distribution. Cette démarche s'accompagne de la réhabilitation et de l'augmentation des capacités des réservoirs existants, ainsi que de la construction de nouveaux bassins de stockage. Ces infrastructures améliorées permettent une gestion plus flexible des volumes stockés, notamment pour faire face aux variations saisonnières de la demande, en particulier pendant la période estivale où la consommation est maximale.

Par ailleurs, l'intégration des technologies modernes joue un rôle clé dans l'optimisation de la gestion de l'eau. L'adoption de systèmes de télégestion, comme le SCADA, permet une **surveillance continue et en temps réel** du réseau, facilitant la détection rapide des anomalies telles que les fuites, les baisses de pression ou les défaillances des équipements. Cette surveillance intelligente permet de réduire les pertes en intervenant rapidement et de garantir une meilleure qualité de service.

En complément des aspects techniques, une stratégie de sensibilisation auprès de la population locale est également mise en œuvre. Des campagnes d'information visent à encourager une utilisation responsable de l'eau, notamment à travers des programmes

éducatifs et des actions de communication ciblées. Ces initiatives contribuent à réduire le gaspillage domestique et à renforcer la conscience collective sur l'importance de préserver cette ressource précieuse.

Enfin, la coordination entre les différents acteurs locaux, institutionnels et techniques est essentielle pour assurer la réussite de ces stratégies. Une gestion intégrée des ressources hydriques, combinant infrastructures, technologies avancées et engagement citoyen, apparaît comme la meilleure voie pour répondre aux défis actuels et futurs de la wilaya de Blida. [21]

2.6 Infrastructure l'unité distribution de blida

L'Algérienne des Eaux (ADE) dispose d'une station de distribution à Beni Tamou, commune de la wilaya de Blida, l'un des points de service de proximité de l'ADE, pour assurer la production, la distribution et la gestion de l'eau potable ainsi que l'assainissement, en garantissant la qualité de l'eau, l'accès aux zones les plus isolées et un service client réactif. Ses missions s'inscrivent dans le cadre légal de création de l'ADE (Décret exécutif n° 01-024) et répondent aux orientations stratégiques définies par l'établissement public.

L'unité de distribution de l'ADE, mettant en évidence une répartition claire des rôles et des responsabilités. La hiérarchie, placée sous l'autorité du Directeur d'Unité, assure une gestion équilibrée entre les aspects techniques, commerciaux et administratifs, illustré dans cet organigramme [18].

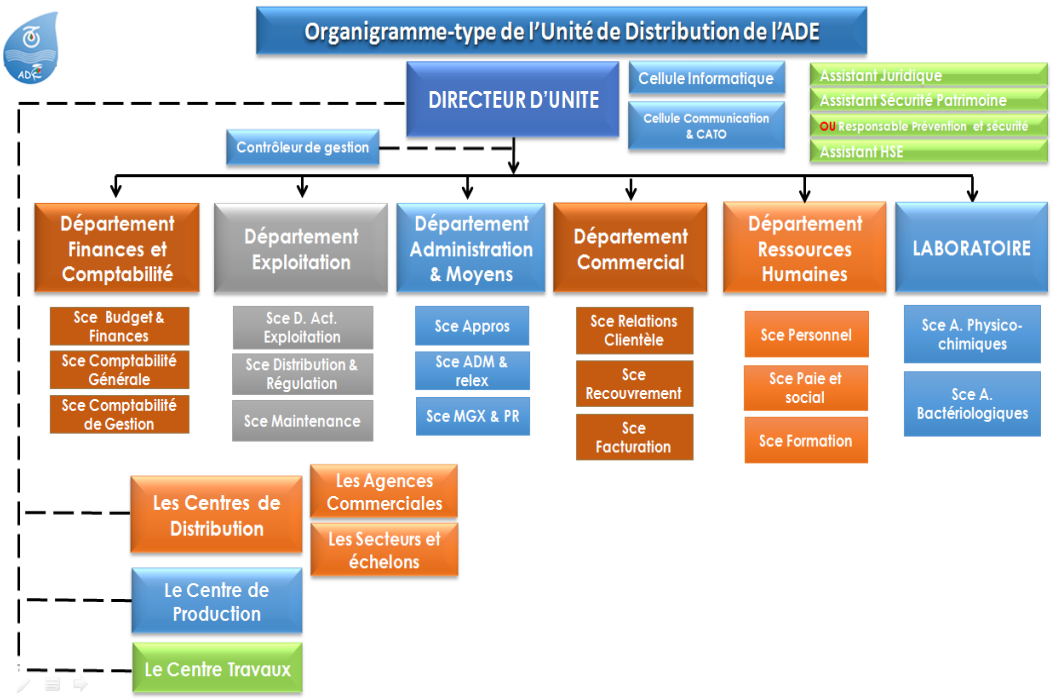

Figure 9: Organigramme de l'unité de distribution de l'ADE

Cet organigramme est un outil efficace pour visualiser les responsabilités au sein de l'ADE, favorisant une gestion transparente et efficiente des ressources hydriques.

Les infrastructures de l'Algérienne des Eaux (ADE) dans la wilaya de Blida, sont établies par **décret n°01-101 du 21 avril 2001** qui détaille les indicateurs essentiels de couverture, de capacité et de gestion du réseau d'eau potable, couvrant l'ensemble des **25 communes** de la wilaya.

- ***Organisation opérationnelle :***
  - Nombre de centres : 11 (dont 10 centres de distribution et 01 centre de production).
  - Effectif total du personnel : 990 agents.
  - Nombre d'agences locales : 19.
  - Nombre d'abonnés au service d'eau : 293 442.
- ***Indicateurs d'infrastructure :***
  - Forages : 432 points de captage.
  - Captages de sources : 15 installations.
  - Puits : 03 en activité.
  - Stations de pompage/reprise : 77 unités.
  - Stations de traitement mono bloc : 06.
  - Réseau d'adduction : 934 km de linéaire.
  - Réseau de distribution : 1 693 km de linéaire (total combiné : 2 627 km).
  - Ouvrages de stockage : 237 réservoirs.
  - Capacité totale de stockage : 243 875 m³.

Ces données reflètent l'ampleur des infrastructures déployées pour assurer l'accès à l'eau potable dans la wilaya, avec un réseau étendu et diversifié (forages, captages, stations de traitement). La couverture quasi-totale des communes et la capacité de stockage importante démontrent une organisation robuste, essentielle pour répondre aux besoins croissants. [18]

2.7 Présentation de la station de Beni Tamou

Le système de Beni Tamou est un réseau essentiel de distribution d'eau dans blida, composé de plusieurs infrastructures interconnectées, notamment des réservoirs, des stations de pompage et des canalisations.

Le point de départ de ce système est le captage de Beni Tamou, où l'eau est collectée avant d'être dirigée vers les réservoirs de stockage. Parmi ces réservoirs, on trouve deux installations principales situées à Beni Tamou :

- **Un premier réservoir d'une capacité de 5 000 m³ (nouveau)**
- **Un second deux réservoir plus petit de 2*2000m³**

Ces réservoirs jouent un rôle central dans l'acheminement de l'eau vers diverses zones, notamment Ouled yaich partie nord et Guerouaou.

D'autres structures de stockage renforcent le réseau, comme le réservoir Hmalit, d'une capacité impressionnante de **4*5000 m³,** qui redistribue l'eau vers plusieurs localités. Un autre grand réservoir, Ben badis, complète cette organisation et alimente des régions telles que Blida Est et Ouled Yaich.

Pour assurer une distribution efficace, le système intègre plusieurs châteaux d'eau, dont :

- **Le Château d'eau de Beni Tamou 1000m³**
- **Le Château d'eau Zaouia 1000m³**

Ces infrastructures garantissent une pression stable et une régulation efficace de l'approvisionnement en eau.

Le réseau comprend également des stations de pompage, essentielles pour maintenir un débit optimal. Parmi elles, on retrouve :

- SP3 (eau de la station de dessalement Fouka 2)

- les forages

Enfin, le système de Beni Tamou repose aussi sur 37 forages, qui contribuent à renforcer l'alimentation en eau de l'ensemble du réseau.

Grâce à cette organisation complexe et interconnectée, le système assure une distribution efficace de l'eau aux différentes localités desservies. [18]

La figure suivante présente un Schéma Synoptique du système de distribution de Beni Tamou.

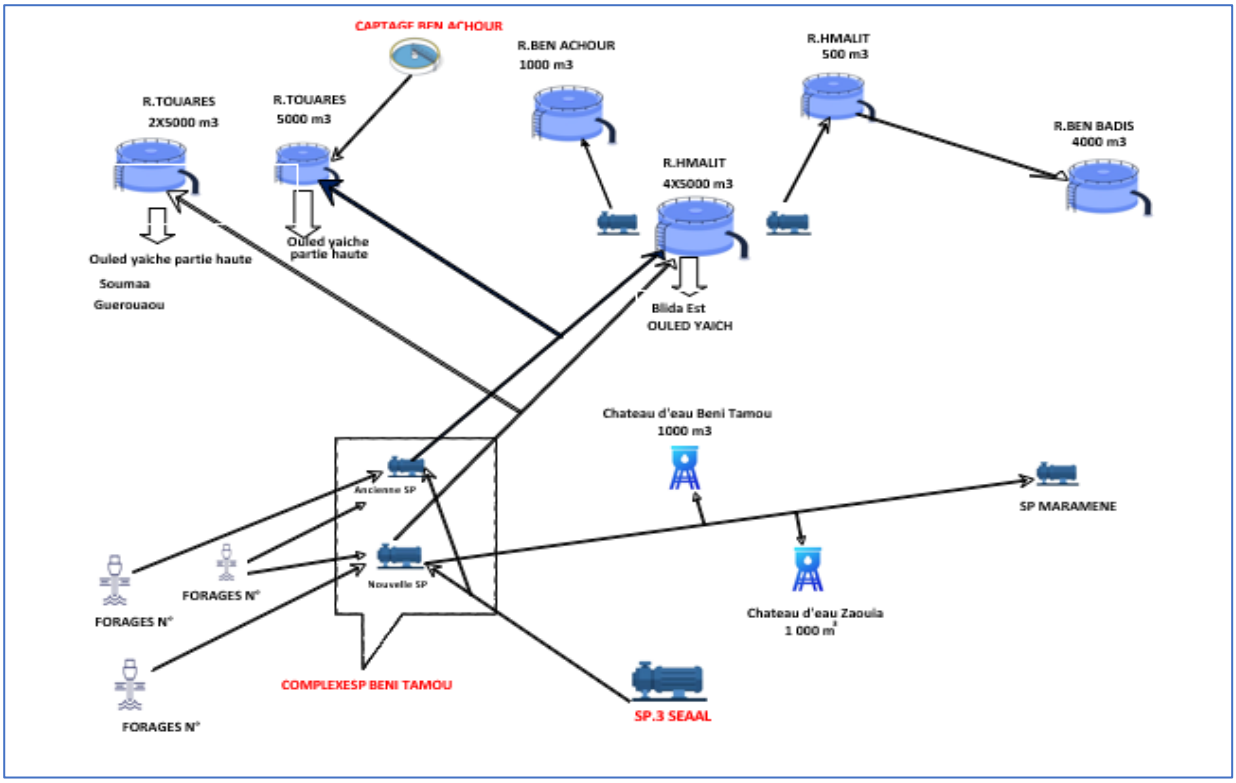

Figure 10 : Schéma Synoptique du système de distribution de Beni Tamou

La station de pompage de Beni Tamou utilise des groupes électropompes horizontaux (GEPH), tandis que les forages sont équipés de pompes immergées (GEPI) pour pomper l'eau souterraine (figure 11,12).

Figure 11: groupes électropompes horizontaux (GEPH)

Figure 12: groupes électropompes Immergés (GEPI)

Les conduites principales acheminent l'eau pompée depuis les 37 forages vers les réservoirs. Chaque forage est numéroté dans le réseau, ce qui permet un suivi précis et une gestion efficace de l'alimentation. Ces conduites sont conçues pour regrouper plusieurs forages selon leur emplacement géographique, facilitant ainsi la distribution et la maintenance.

Grâce à cette organisation complexe et interconnectée, le système assure une distribution continue, équilibrée et sécurisée de l'eau aux différentes localités desservies. [18]

Dans une station de pompage comme celle de **Beni Tamou**, les conduites sont soumises à de fortes pressions hydrauliques, surtout lors des arrêts ou démarrages brusques des pompes. Ce phénomène engendre des **coups de bélier**, c'est-à-dire des variations brutales de pression qui peuvent endommager gravement les installations hydrauliques : fissures, ruptures de conduites, détérioration de vannes, etc. Pour éviter ces incidents, la station de pompage Beni Tamou utilise un dispositif appelé **anti-bélier** (fig13). Ce système permet de :

- **Absorber ou atténuer les surpressions**
- **Protéger les équipements**
- **Assurer la longévité des installations**
- **Garantir un fonctionnement sûr et fiable**

Figure 13: Citerne pour Anti-Bélier

2.7 Présentation du système de télégestion de la station de Beni Tamou

Dans la wilaya de Blida, le réseau de télégestion des stations d'eau potable est déployé sur l'ensemble des sites de pompage et de forage. Pour optimiser la maintenance et le suivi à distance, les stations sont réparties en deux zones :

- **Zone Ouest** : équipements fournis par SOGERHWIT, réalisés par un sous-traitant basé à Kouba.
- **Zone Est** : équipements fournis et mis en œuvre directement par SOGERHWIT.

La station de **Beni Tamou**, située en zone Est, bénéficie d'une installation complète de télégestion réalisée entièrement par SOGERHWIT.

Figure 14: Capteur de niveau de réservoir station Beni Tamou

2.7.1 Architecture de la télégestion à Beni Tamou

La télégestion de la station de Beni Tamou se décline en deux volets complémentaires :

1. **Télégestion de la station de pompage**
2. **Télégestion des forages**

Chaque volet s'appuie sur une **Carte de commande SOGERHWIT** coordonnant les capteurs, protections et éléments de communication qui remontent en temps réel l'état de la station vers le centre de contrôle. [18]

2.7.1.1 Télégestion de la station de pompage

La supervision à distance du poste de pompage repose sur les composants suivants :

- **Carte de commande SOGERHWIT**
- **Parafoudre** (protection contre les surtensions)
- **Disjoncteurs** (alimentation et protection moteur) × 2
- **Relais Micrologique Finder 230 V** (commande et signalisation)
- **Alimentation industrielle** (24 V / 48 V selon configuration)

- **Thermostat** (contrôle de température de l'armoire)
- **Alimentation (chargeur)** (batterie de secours)
- **Capteur ultrasonique** (mesure de niveau d'eau)
- **Transmetteur de pression** (contrôle de la pression de refoulement)
- **Modem** (liaison GPRS/3G/4G vers le SCADA central)

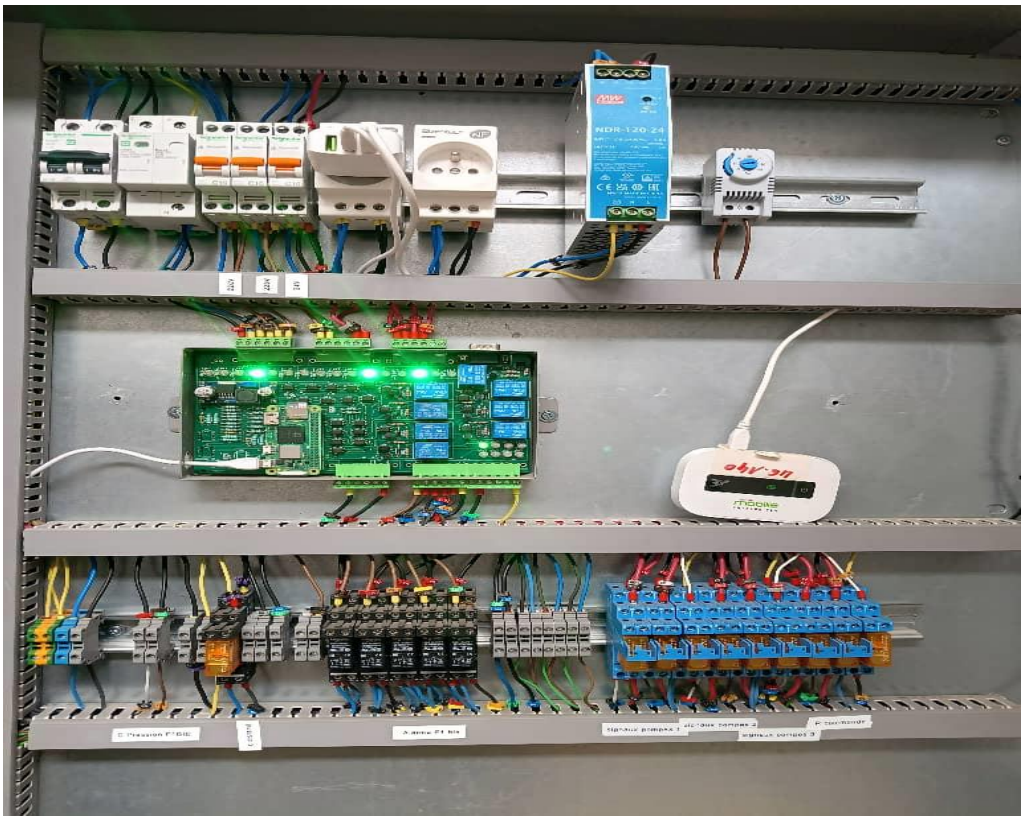

Figure 15:Armoire de Télégestion de la station de pompage

2.7.1.2 Télégestion des forages

Pour les forages, la configuration est très similaire, avec quelques adaptations pour la télésurveillance spécifique aux pompes immergées :

- **Carte de commande SOGERHWIT**
- **Parafoudre**
- **Disjoncteurs** × 2
- **Relais Micrologique Finder 230 V**
- **Alimentation industrielle**
- **Thermostat**
- **Alimentation (chargeur)**

- **Alarmes** (intrusion, niveau bas, détection de gaz éventuelle)
- **Relais d'interface** (pour boîtiers tierces ou acquéreurs de signaux)
- **Transmetteur de pression**
- **Modem**

Figure 16: : Armoire de Télégestion de Forage

Ainsi, même si la station de Beni Tamou est équipée d'un système de télégestion bien développé, elle présente toutefois les inconvénients suivants :

- **Opérateur Mobilis non fonctionnel :** En l'absence de couverture ou de stabilité du réseau Mobilis, les modems ne parviennent pas à établir de liaison fiable avec le SCADA central, ce qui entraîne des « trous » dans les données et des coupures de supervision.
- **Perte de connectivité fréquente :** En l'absence de couverture ou de stabilité du réseau Mobilis, les modems ne parviennent pas à établir de liaison fiable avec le SCADA central, ce qui entraîne des « trous » dans les données et des coupures de supervision.

- **Absence d'alertes en temps réel :** Sans canal GSM/3G/4G opérationnel, les alarmes (niveau bas, surintensité, défaut pompe…) ne sont pas transmises instantanément, retardant la détection et la résolution des incidents.
- **Risque accru de pannes non détectées :** Les coupures prolongées de la télégestion peuvent masquer des dysfonctionnements (défaillance de pompe, surtensions, fuites), augmentant le risque d'endommagement des équipements ou de rupture de service en eau potable.
- **Maintenance réactive et coûteuse :** L'absence de télémétrie empêche la maintenance prédictive : les équipes d'intervention ne disposent pas d'indices préalables sur l'état des appareils et n'interviennent qu'après signalement sur site, ce qui multiplie les déplacements et les coûts
- **Absence de Débitmètre dans la station Beni Tamou :** L'absence de débitmètre à la station de Beni Tamou empêche de mesurer avec précision le volume d'eau pompé, ce qui limite le contrôle et l'optimisation du système.

Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un état des lieux détaillé de la zone d'étude, en mettant en lumière les caractéristiques géographiques, climatiques, hydrologiques et démographiques de la wilaya de Blida, avec un focus particulier sur la commune de Béni Tamou. Nous avons également présenté les principales ressources en eau mobilisées pour l'alimentation en eau potable, ainsi que les infrastructures de distribution mises en place pour répondre aux besoins de la population. L'analyse a révélé une pression croissante sur les ressources disponibles, notamment en raison de l'urbanisation, de la croissance démographique et des effets du changement climatique. Malgré la présence d'un réseau d'infrastructures relativement développé, des insuffisances persistent, notamment en matière de gestion des pertes d'eau et d'optimisation de la distribution. Dans ce contexte, l'introduction de systèmes intelligents de suivi et de gestion, fondés sur les technologies IoT, apparaît comme une solution pertinente pour renforcer l'efficacité, la réactivité et la durabilité du service public d'eau potable. Le chapitre suivant s'intéressera précisément à la conception et à la mise en œuvre d'un tel système, en prenant appui sur l'exemple concret de la station ADE de Béni Tamou.

Chapitre 3 : Contribution du système de télégestion HydroX à la surveillance du Réservoir d'eau de Beni Tamou

Chapitre 3 :

Contribution Du Système de télégestion HydroX à la Surveillance Du Réservoir D'Eau De Beni Tamou

Introduction

Le but de ce chapitre est de détailler les techniques, les langages de programmation et les outils employés pour la réalisation de notre système de télégestion nommé « **HydroX** ». Nous examinerons les différents composants du système et les expliquerons en détail. De plus, diverses interfaces seront incluses pour illustrer les différentes options et fonctionnalités disponibles. Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble complète du processus de mise en œuvre, en mettant en lumière les éléments essentiels et les choix technologiques effectués.

3.1. Présentation du système HydroX

3.1.1. Interfaces de la plateforme HydroX réalisée

Développée par MOUSSOUS&DRIOUCH© 2025 | USDB, HydroX représente une approche sophistiquée des systèmes modernes de gestion de l'eau et de l'environnement. C'est une solution innovante basée sur l'IoT que nous avons développé dans le cadre de la surveillance du réservoir d'eau de Beni Tamou.

Figure 17: HydroX

Cette application offre une surveillance en temps réel des niveaux d'eau avec une visualisation dynamique, affichant des mesures en pourcentage et des configurations de hauteur de réservoir. Le système va au-delà de la simple gestion de l'eau pour inclure un suivi environnemental complet, mesurant la température en degré Celsius et Fahrenheit, [Figure 5]

HydroX propose une interface moderne et réactive, avec un support des modes de thème clair et sombre. L'application offre deux modes de connectivité (Wi-Fi et Point d'Accès),

garantissant une transmission fiable des données et une accessibilité du système. Parmi les fonctionnalités avancées, on trouve des taux de lecture et de notifications personnalisables, une visualisation en temps réel des données via des graphiques interactifs, ainsi qu'un système de lecture audio intégré. L'architecture de la plateforme inclut des capacités de reconnexion automatique, de gestion des erreurs et de gestion persistante des paramètres.

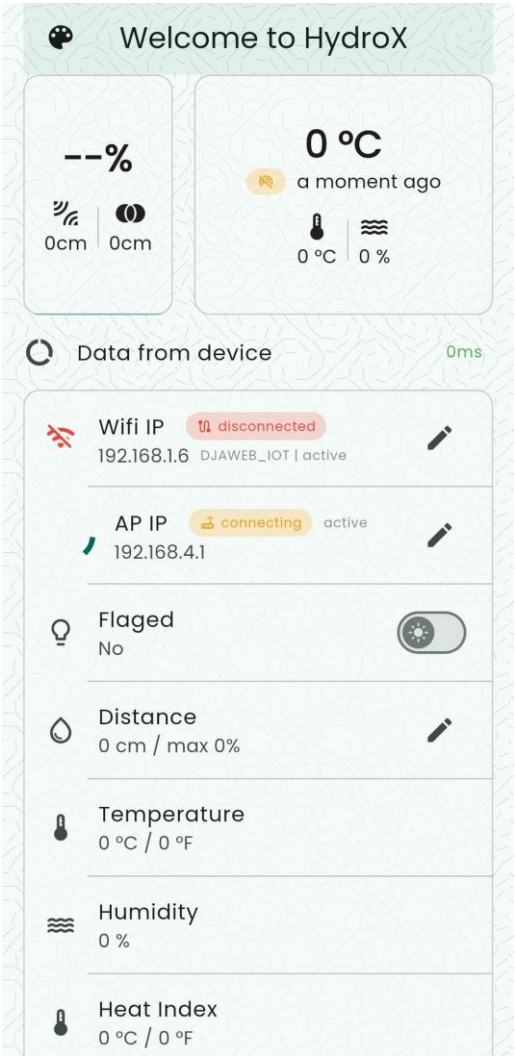

Figure 18: Interface de l'application mobile HydroX

Si l'application mobile HydroX constitue le cœur de l'interaction utilisateur, une interface web a également été développée afin d'élargir les possibilités d'accès et de supervision. Cette version web complète parfaitement l'application mobile en offrant un accès distant, simple et efficace aux données de surveillance des réservoirs d'eau. Développée avec Flutter Web, elle permet aux utilisateurs de consulter en temps réel les niveaux d'eau, la température et l'humidité depuis n'importe quel navigateur, tout en conservant la même logique de

fonctionnement et la même fluidité d'expérience que sur mobile. Grâce à une architecture moderne intégrant WebSocket et API REST, cette interface garantit une communication fluide avec les capteurs et offre une expérience utilisateur réactive, intuitive et adaptable à tous les types d'appareils.

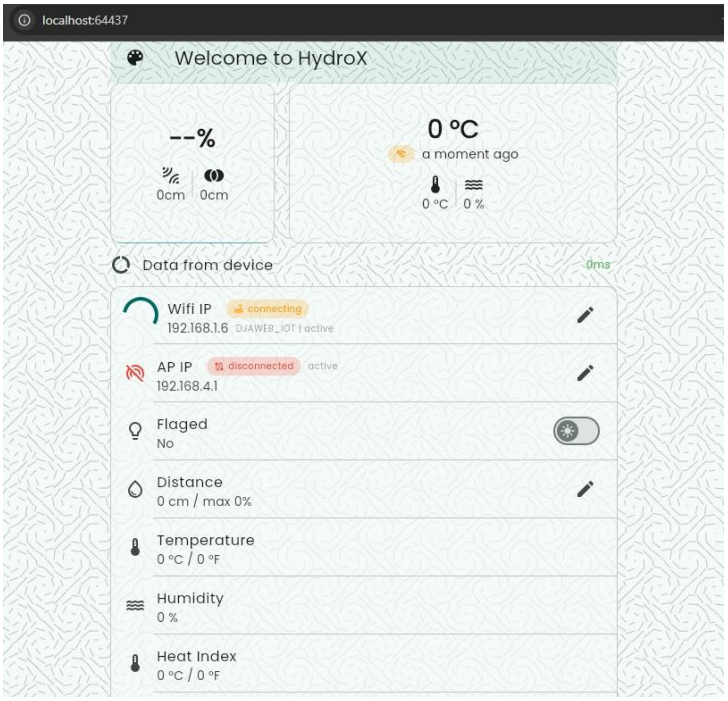

Figure 19: Interface de HydroX version web

3.1.2 Outils de développement multiplateforme

Pour le développement de notre application HydroX, nous avons utilisé les logiciels suivants :

1. **Langage Dart :** Dart est un langage de programmation optimisé pour les applications clients, conçu pour développer des applications rapides sur diverses plateformes. Il vise à être le langage de programmation le plus productif pour le développement multiplateforme, soutenu par une plateforme d'exécution flexible adaptée aux cadres d'applications.

   Dart est fortement typé, ce qui signifie que chaque variable doit être déclarée avec un type spécifique. Il prend en charge la programmation orientée objet avec des classes et des interfaces, offrant ainsi une structure organisée et robuste pour les projets de grande envergure. [22]

Figure 20:Logo Dart

2. **FLUTTER :** Flutter est un kit de développement logiciel open source créé par Google. Il est utilisé pour développer des applications mobiles et web localement à partir d'une seule base de lame Flutter fonctionne avec le code actuel, est utilisé par les développeurs et les organisations du monde entier, et est gratuit et open source. [23]

Figure 21: Logo du logiciel Flutter

3. Arduino

Il s'agit d'un environnement de développement officiel utilisé pour programmer les cartes électroniques de la marque Arduino. C'est une interface simple et intuitive, conçue pour les débutants, les étudiants, les makers et même les ingénieurs.

Il permet d'écrire du code en langage C/C++, puis de le compiler et de le téléverser directement sur la carte Arduino connectée à l'ordinateur. [24]

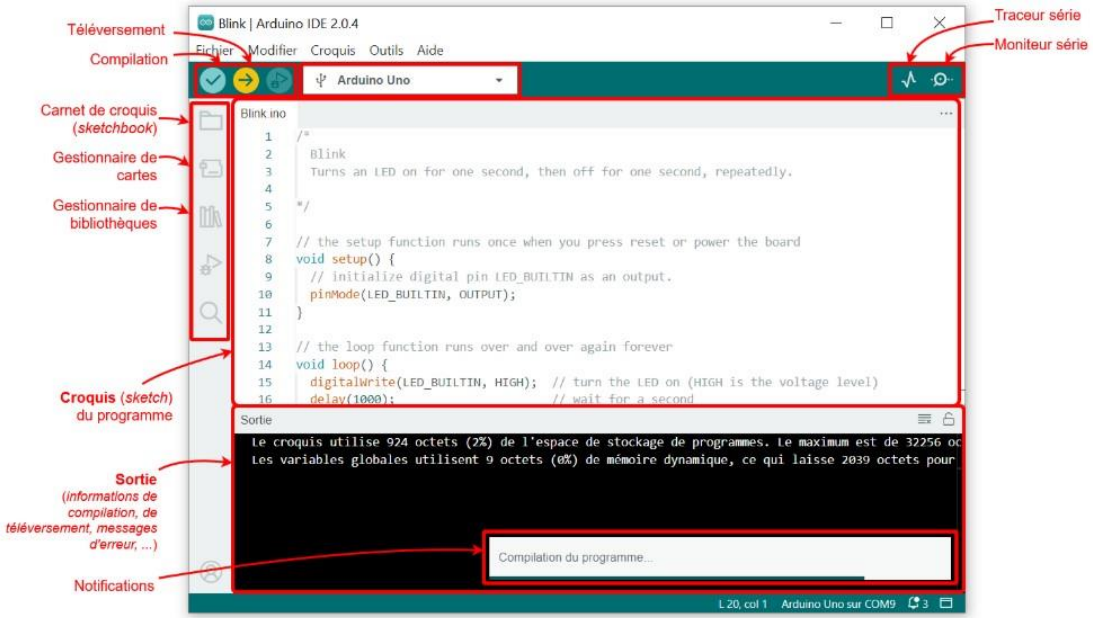

Figure 22: Interface du logiciel Arduino IDE

3.1.3 Hardware

Les composants électroniques utilisés pour la mise en œuvre de notre système HydroX sont les suivants :

- **Esp32 :** est une petite carte électronique intelligente qui permet de connecter des objets à Internet grâce au Wi-Fi et au Bluetooth. Elle est utilisée dans de nombreux projets comme les maisons connectées, les systèmes de surveillance ou les capteurs automatiques, et peut être programmée facilement avec un ordinateur. [25]
- **Ultrasonique imperméable RCWL-1670** est un capteur ultrasonique étanche conçu pour mesurer des distances entre 2 cm et 400 cm, même dans des environnements humides ou difficiles. Il fonctionne avec une tension de 3 à 5 volts, consomme très peu d'énergie, et est compatible avec les logiciels du capteur HC-SR04. Grâce à sa résistance à l'eau et à la poussière, il est idéal pour surveiller le niveau d'eau dans des réservoirs, l'irrigation automatique, ou d'autres systèmes connectés extérieurs. [26].
- **Capteur de température** : Le DS18B20 est un capteur de température numérique très utilisé dans les projets électroniques. Il mesure des températures allant de -55°C à +125°C avec une précision de ±0,5°C entre -10°C et +85°C. Il communique via le bus 1-Wire, ce qui permet de connecter plusieurs capteurs sur une seule broche d'un microcontrôleur (comme l'ESP32 ou l'Arduino). Ce capteur peut être utilisé en

version étanche, ce qui le rend parfait pour des applications dans l'eau ou dans des environnements humides, comme la surveillance de la température d'un réservoir ou d'un sol agricole. [27]

- **LCD 1602 :** est un petit écran d'affichage à cristaux liquides qui peut afficher 2 lignes de 16 caractères. Il est souvent utilisé avec les microcontrôleurs comme l'Arduino ou l'ESP32 pour afficher des informations (texte, données de capteurs, messages d'état). Il fonctionne via une interface parallèle (HD44780) ou avec un module I2C pour simplifier le câblage (seulement 4 fils). Il est très populaire pour sa facilité d'utilisation et son faible coût. [28]

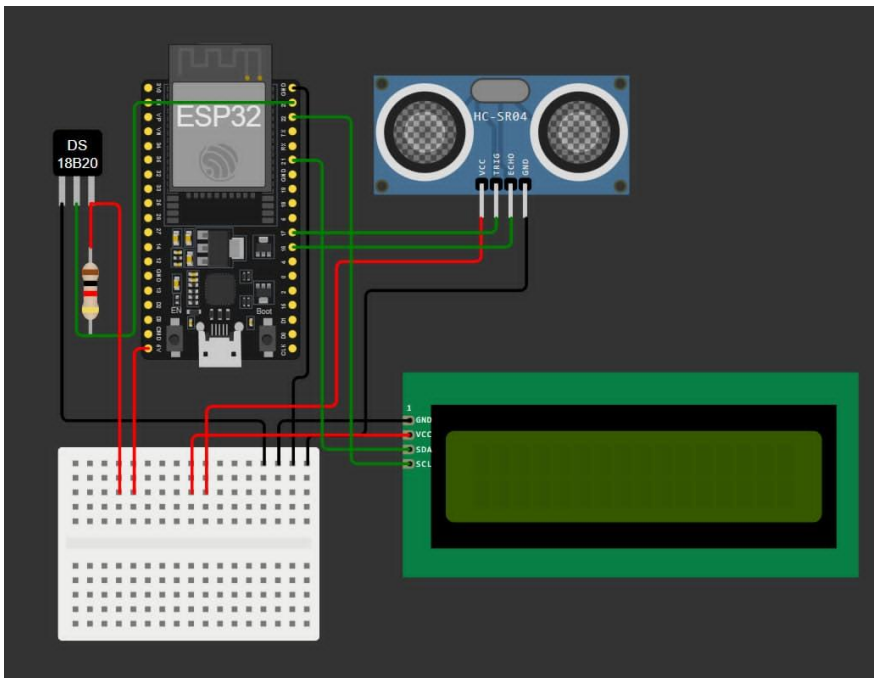

Figure 23: Architecture du système HydroX

3.2 Tests et résultats de contribution du système de télégestion « HydroX »

Dans le cadre de la validation expérimentale du système HydroX, plusieurs essais ont été conduits afin d'évaluer la précision des mesures relatives au niveau d'eau et à la température. Les données obtenues via les différentes interfaces du système ont été comparées à celles relevées manuellement ou localement, à partir de l'écran intégré au dispositif embarqué. Le réservoir principal de la station de Béni Tamou présente une hauteur maximale théorique de 5 mètres (500 cm). Lors de la phase test, un niveau de référence calibré à 4,30 m (430 cm) a été retenu comme repère pour l'étalonnage du système, alors que le niveau réel de l'eau observé durant les mesures expérimentales s'élevait à 2,20 m (220 cm). Les valeurs relevées pour le niveau d'eau ont présenté une certaine hétérogénéité selon l'interface utilisée : 213,74 cm sur l'écran LCD connecté au microcontrôleur, entre 210 cm et 215,695 cm sur l'application mobile, jusqu'à 215,95 cm sur la version web de l'interface.

Cette dispersion peut être attribuée à l'absence de fixation rigide du capteur ultrasonique, provoquant des micro-déplacements du capteur et donc des fluctuations aléatoires dans les mesures. Ces oscillations apparaissent clairement sur les graphiques en temps réel de l'application, typiques d'une surface de mesure exposée à des instabilités mécaniques. De plus, le capteur ultrasonique RCWL-1670 utilisé dans notre système repose sur le principe du temps de vol pour estimer les distances. Toutefois, sa précision dépend étroitement de la vitesse du son dans l'eau, laquelle varie avec la température : de 1402 m/s à 0 °C à 1540 m/s à 50 °C. En l'absence de correction thermique automatique, cette variation peut induire des erreurs proportionnelles dans le calcul des distances, compromettant ainsi la fiabilité globale des mesures dans un milieu aquatique réel.

Pour la vérification des résultats, une sonde piézométrique du laboratoire du département a été utilisée pour mesurer le niveau d'eau et la température avec précision. Concernant la température, l'interface web du système a affiché une valeur stable de 23,188 °C, très proche de celle relevée sur l'écran LCD (23,25 °C), ainsi que de la mesure obtenue via la sonde (23 °C). Ces deux dernières valeurs correspondent à la température réelle de l'eau, tandis que la température affichée dans la version mobile de l'application HydroX reflète en réalité la température de l'air emprisonné dans l'espace vide entre la surface de l'eau et le capteur. Cette distinction explique les écarts observés dans certains cas et souligne l'importance d'identifier clairement la provenance des données dans une interface multi-capteurs.

Taux de remplissage actuel

En se basant sur la hauteur maximale utile (430 cm) et la mesure actuelle de 220 cm, le taux de remplissage est estimé à : Taux de remplissage : 220/430×100 ≈ 51.1% Ce résultat est cohérent avec l'estimation fournie par l'application HydroX (valeurs affichées proches de 49-51 %).

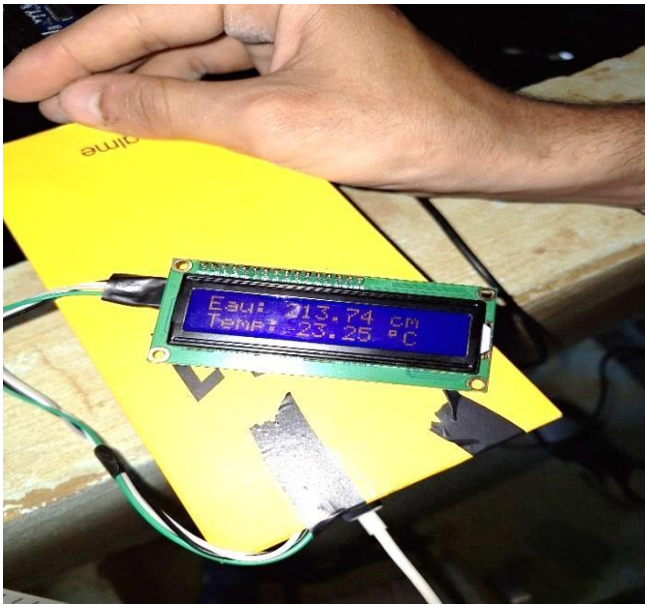

Figure 24:Niveau d'eau et température enregistrés par le système HydroX sur LCD

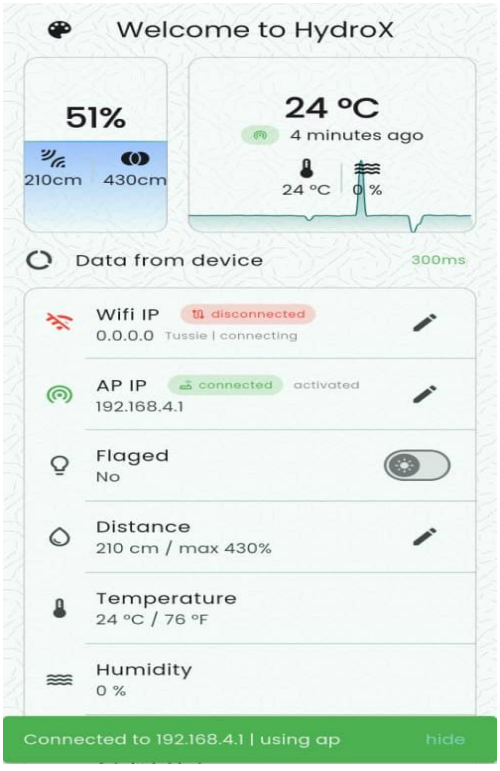

Figure 25: Niveau d'eau et température enregistrés sur l'application mobile HydroX

Figure 26: Température enregistrée par la sonde piézométrique

Figure 27: Niveau d'eau maximal du réservoir

Conclusion

Il convient de rappeler que ces expérimentations ont été réalisées dans un contexte où le système SCADA de la station de Béni Tamou était hors service, rendant toute supervision centralisée impossible. Dans ce contexte, la solution HydroX s'est révélée fiable, réactive et adaptée, offrant une alternative opérationnelle et pertinente pour la télésurveillance des

installations, notamment dans des environnements dépourvus de systèmes automatisés complets.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Face aux défis croissants liés à la raréfaction des ressources hydriques, notamment dans des régions vulnérables comme la wilaya de Blida, la nécessité de recourir à des outils de gestion intelligents et accessibles s'impose avec urgence. Ce mémoire s'est inscrit dans cette dynamique en proposant le développement et la mise en œuvre d'un système de télégestion innovant, baptisé HydroX, destiné à la surveillance en temps réel du réservoir d'eau potable de la station de Béni Tamou.

Reposant sur les technologies de l'Internet des Objets (IoT), HydroX a démontré sa capacité à mesurer avec précision des paramètres clés tels que le niveau d'eau et la température, tout en assurant une visualisation continue via des interfaces mobiles et web. Les tests comparatifs effectués avec des instruments de référence ont validé la fiabilité du système, malgré quelques écarts mineurs liés aux limitations physiques du matériel (capteurs non fixés, absence de correction thermique).

Au-delà des aspects techniques, ce projet met en lumière la pertinence des solutions open source et modulaires comme alternatives aux systèmes SCADA, souvent indisponibles ou obsolètes dans certaines infrastructures publiques. HydroX incarne une solution autonome, économique et facilement déployable, offrant une réponse concrète aux besoins des collectivités locales en matière de gestion durable de l'eau.

Par ailleurs, plusieurs perspectives d'évolution ont été identifiées, telles que :

- L'ajout de capteurs environnementaux complémentaires (pression, turbidité, pH)
- L'intégration d'une alimentation par énergie solaire pour une autonomie complète
- Le déploiement à plus grande échelle au sein d'autres stations hydrauliques régionales.

En somme, cette étude a permis de démontrer que l'alliance entre l'ingénierie hydraulique et les technologies embarquées représente une voie prometteuse pour moderniser la gestion des ressources en eau en Algérie. Le système HydroX, par sa simplicité, sa robustesse et sa capacité d'adaptation, représente un outil d'aide à la décision dans la lutte contre le gaspillage et l'optimisation de l'approvisionnement en eau potable.

Références

[1] ANRH, «Agence Nationale des Ressources Hydriques,» 2025.

[2] Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique, «Système National de Planification et de Prévision des Ressources en Eau,» alger, 2022.

[3] Guereueb.M, «La gestion des eaux en Algérie 315-303 ,(1)6 ,مجلة البحوث الاقتصادية المتقدمة.,» 2021.

[4] ANBT, «Agence Nationale des Barrages et Transferts,» 2024.

[5] Djilali.A, Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux, 2021.

[6] RedHat, ««L'IoT, qu'est-ce que c'est ?,»,» *8 1 2019. [En ligne]. Available: https://www.redhat.com/fr/topics/internet-of-things/what-is-iot.*

[7] I. Systems, «Qu'est-ce que la télégestion ?,» *[En ligne]. Available: https://www.ipsystemes.,* 2023.

[8] Greengard.S, The Internet of Things. Cambridge, Cambridge,USA: MITPress, 2015.

[9] Rayes.A, «Internet of Things From Hype to Reality,» *the Road to Digitization,* 2017.

[10] Khan.R, «Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges.,» *International Conference on Frontiers of Information Technology,* pp. 257-260, 2012.

[11] Farhan.B, «Design and Construct Intelligent Tank Water Level Sensor,» *Farhan, B. I. (2018). Design and Const Journal of Al-Qadisiyah for computer science and mathematics,,* vol. 3, n° %110, pp. Page-1, 2018.

[12] Sharma.V, «Arduino based Smart Water Management,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),,* vol. 9, n° %108, pp. 652-656, 2023.

[13] Khan.A, «Applications of Smart Water Management Systems: A Literature Review,» *Water, MDPI,* vol. 15, n° %104, p. 728, 2023.

[14] Kumar.N, «Arduino Based Smart Water Management System for Water Loss Reduction,» *IEEE International Conference on Smart Technologies and Systems for Next Generation Computing (ICSTSN),* p. 547–552, 2023.

[15] Sharma.R, «Smart Water Management Grid,» *International Journal of Innovative Science and Research Technology,* vol. 7, n° %14, pp. 150-154, 2022.

[16] Bada.Y, «Armature urbaine 2011, p. 42.,» 2011.

[17] Boumelki.A, «étude de la variation annuelle de la wilaya de blida entre 2011 et 2021,» 2021.

[18] ADE, «Algérienne des eaux,» 2025.

[19] DRE, «Direction des ressources en eau,» 2025.

[20] d. C. L. e. d. l. d. T. Ministère de l'Intérieur, «Potentialités de la wilaya :Blida,» [En ligne]. Available: https://interieur.gov.dz/Monographie/.

[21] ADE, «Plan stratégique pour la gestion durable de l'eau dans la wilaya de Blida,» *Rapport technique,* 2023.

[22] «Dart Documentation,» [En ligne]. Available: https://dart.dev/docs.

[23] «Flutter Docs,» [En ligne]. Available: https://flutter.dev.

[24] «arduino education,» [En ligne]. Available: https://www.arduino.cc.

[25] Esprssif.com, «Esprssif.com,» [En ligne]. Available: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32.

[26] ICStation, «ICStation,» [En ligne]. Available: https://www.icstation.com.

[27] M. Integrated, «DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer,,» 2022. [En ligne]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf.

[28] «SunFounder Docs,» [En ligne]. Available: https://docs.sunfounder.com/projects/esp32-starter-kit/en/latest/.