

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Dans le cadre de l'arrêté 008(1275)

Par : BENGHELIMA Nabila & BAHRAOUI Douae

Sujet

Spectrophotomètre connecté

Soutenu publiquement, le 06/07/2025, devant le jury composé de :

Mlle RAHOU Fatima Zohra	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
Mme GHEFIR Fatiha Djazia	Grade	Université de Tlemcen	Examineur
Mr BAGHDADLI Ilyas	Ingenieur	Aid-joint directeur ANBT	Examineur
Mlle HANDOUZI Wahida	I2E	Université de Tlemcen	Examineur
Pr BENADDA Belkacem	Pr	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2024 /2025

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect et toute la reconnaissance que je ressens, je dédie ma remise de diplôme et ma joie :

À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et de mon bonheur, à ma lune, au fil d'espoir qui éclaire chacun de mes pas, à ma moitié, **ma maman Rabia.**

À celui qui a fait de moi une femme, à ma source de vie, d'amour et de tendresse, à mon soutien, toujours à mes côtés pour m'encourager et me porter, à mon prince, **mon papa Mahfoud.**

À mes chères sœurs **Rania, Farah** et **Mayada**, pour leur soutien inébranlable, leurs encouragements sincères et leur présence réconfortante dans les moments difficiles.

Sans oublier mon binôme **Douae**, pour sa présence rassurante, sa pertinence et sa compréhension tout au long de ce projet.

À toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment.

NABILA

Dédicace

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour Sa générosité infinie, pour m'avoir guidée, entourée de Sa miséricorde et accordé la force de mener ce travail à terme.

Je dédie ce travail, fruit d'années d'efforts, de défis et d'espoir, à ceux qui ont été les piliers de mon chemin :

À ma précieuse mère Noura, lumière de mon chemin, refuge de mon cœur, dont l'amour et les prières silencieuses ont été ma force la plus douce.

À mon père bien-aimé Abdelghani, pilier de ma vie, pour ses sacrifices silencieux, sa sagesse et son amour inconditionnel.

À mes sœurs chéries, **Rabab** et **Fatima**, complices de chaque étape, gardiennes de mes secrets, et source inépuisable de joie dans ma vie.

À mon petit frère **Eyad**, le plus jeune, mais l'un des plus grands bonheurs de ma vie.

À **Hadjer**, amie et soutien de chaque instant, toujours là au bon moment, sans jamais rien attendre en retour.

À **Nabila**, ma binôme et compagne de ces années universitaires, pour son engagement constant, sa patience et ce chemin parcouru côte à côte.

À tous les absents de ces lignes, mais jamais absents de mon cœur.

Et enfin...

À **Douae**, cette petite fille pleine de rêves, qui a douté parfois, mais qui a choisi de croire en elle, de se relever et de continuer. Cette dédicace est aussi pour toi, avec fierté.

DOUAE

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah Tout-Puissant, le Miséricordieux, pour nous avoir accordé la patience, la force et la clarté d'esprit nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Professeur **BENADDA Belkacem**, notre encadrant, pour sa confiance, son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nous remercions sincèrement Mademoiselle **RAHOU Fatima Zohra**, présidente du jury, pour sa bienveillance, son écoute et sa disponibilité.

Nos remerciements vont également à Madame **GHEFIR Fatiha Djazia**, examinatrice, ainsi qu'à Mr BAGHDADLI Ilyas Aid-joint directeur barrage Mafrouch Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT), et Mlle HANDOUZI Wahida (Représentante de I2E), enseignants examinateurs, pour l'honneur qu'ils nous font d'évaluer ce mémoire et pour leurs remarques constructives.

Nous remercions l'ensemble des enseignants du département de Génie Électrique et Électronique pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont dispensé tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous nos collègues, amis et à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans une démarche de conception et de réalisation d'un dispositif intelligent et connecté pour l'analyse de la qualité de l'eau. Face aux enjeux croissants liés à la pollution des ressources hydriques, nous avons proposé une solution innovante, portable et à faible coût, capable de fournir des indications fiables sur certains paramètres physico-chimiques essentiels tels que le pH, la turbidité et la teneur en chlore.

Le fonctionnement du système repose sur un principe simple : un capteur optique analyse la lumière réfléchie par un échantillon d'eau éclairé, afin d'en extraire des informations colorimétriques. Ces données sont ensuite traitées localement par un microcontrôleur intégré, puis interprétées à l'aide d'algorithmes capables d'estimer les valeurs recherchées. Les résultats sont affichés en temps réel sur une interface web intuitive, accessible à distance depuis tout appareil connecté au même réseau.

Ce projet s'inscrit dans le cadre plus large de l'Internet Industriel des Objets (IIoT), en combinant capteurs intelligents, traitement embarqué, et connectivité réseau pour offrir une surveillance autonome, flexible et continue de la qualité de l'eau. L'approche développée vise ainsi à démocratiser l'accès à des outils de suivi environnemental, à travers une solution évolutive et adaptée aux besoins éducatifs, agricoles et communautaires.

Mots-clés :

Qualité de l'eau, dispositif intelligent, capteur optique, microcontrôleur intégré, interface web, modèles intelligents, Internet industriel des objets.

Abstract

This work falls within the framework of designing and developing an intelligent and connected device for monitoring water quality. In response to the growing challenges related to water resource pollution, we propose an innovative, portable, and low-cost solution capable of providing reliable indications of key physicochemical parameters, such as pH, turbidity, and chlorine content.

The system operates on a simple principle: an optical sensor analyzes the light reflected from an illuminated water sample to extract colorimetric information. This data is then processed locally by an embedded microcontroller and interpreted using algorithms capable of estimating the desired values. The results are displayed in real time through an intuitive web interface, accessible remotely from any device connected to the same network.

This project is part of the broader Industrial Internet of Things (IIoT) approach, combining smart sensing, embedded processing, and network connectivity to offer autonomous, flexible, and continuous water quality monitoring. The developed solution aims to democratize access to environmental monitoring tools through an adaptable and scalable system tailored to educational, agricultural, and community needs.

Keywords :

Water quality, intelligent device, optical sensor, embedded microcontroller, web interface, intelligent models, Industrial Internet of Things.

ملخص

يأتي هذا العمل في إطار تصميم وتنفيذ جهاز ذكي ومتصل لمراقبة جودة المياه. في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بتلوث الموارد المائية، اقترحنا حلاً مبتكراً، محمولاً ومنخفض التكلفة، قادراً على توفير مؤشرات موثوقة حول بعض المعايير الفيزيائية والكيميائية الأساسية مثل درجة الحموضة، العكارة، وتركيز الكلور.

يعتمد تشغيل النظام على مبدأ بسيط: يقوم مستشعر بصري بتحليل الضوء المنعكس من عينة ماء مضاءة، لاستخراج معلومات لونية. تُعالج هذه البيانات محلياً بواسطة متحكم دقيق مدمج، ثم تُفسر باستخدام خوارزميات قادرة على تقدير القيم المطلوبة. يتم عرض النتائج في الوقت الحقيقي عبر واجهة ويب تفاعلية، يمكن الوصول إليها عن بُعد من أي جهاز متصل بنفس الشبكة.

يندرج هذا المشروع ضمن التوجه الأوسع لإنترنت الأشياء الصناعي، حيث يجمع بين أجهزة الاستشعار الذكية، المعالجة المحلية، والاتصال الشبكي لتوفير مراقبة ذاتية ومرنة ومستمرة لجودة المياه. وتسعى هذه المقاربة إلى ديمقراطية الوصول إلى أدوات مراقبة بيئية، من خلال حل قابل للتطوير، يتكيف مع الاحتياجات التعليمية والزراعية والمجتمعية.

الكلمات المفتاحية: جودة المياه، جهاز ذكي، مستشعر بصري، متحكم دقيق مدمج، واجهة ويب، نماذج ذكية، إنترنت الأشياء الصناعي.

Table des matières :

Dédicace	2
Dédicace	3
Remerciement	4
Résumé	5
Abstract	5
ملخص	5
Liste des figures	8
Liste des tableaux	9
Liste des abréviations	10
Introduction	11
CHAPITRE I : MESURE DE LA QUALITE DE L'EAU PAR SPECTROMETRIE	13
I.1 Introduction	14
I.2 La spectrophotométrie	14
I.3 Conception d'un spectrophotomètre	15
I.4 Sources lumineuses	15
I.5 Détecteur	16
I.6 Monochromateur	16
I.7 Compartiment de l'échantillon :	17
I.8 Conclusion:	18
CHAPITRE II : IIOT : L'INTERNET INDUSTRIEL DES OBJETS :	19
II.1 Introduction	20
II.2 Principe IoT :	20
II.3 L'Internet Industriel des Objets IIOT	21
II.4 Architecture d'un système IOT	22
II.5 Application IIOT pour la qualité de l'eau :	24
II.6 Conclusion	25
CHAPITRE III : DEVELOPPEMENT DU SYSTEME IIOT POUR LA MESURE DE LA QUALITE DE L'EAU	26
III.1 Introduction	27
III.2 Architecture matériel proposée	27
III.3 Schéma de connexion entre le capteur TCS3200 et le Raspberry PI	34
III.4 solution logiciel développée pour l'analyse de la qualité de l'eau :	35
III.5 Développement de l'interface avec Django :	38
III.6 Modélisation 3D du prototype final :	43
III.7 Conclusion :	45
CHAPITRE IV : MODELE D'AFFAIRES HYDRO PRO SCAN	46

Liste des figures

Figure I-1: spectre électromagnétique	14
Figure I-2 : Schéma de la disposition interne d'un spectrophotomètre UV-Vis-NIR Agilent Cary 5000	15
Figure I-3 : Représentation de la dispersion par un réseau holographique de la lumière blanche.	17
Figure I-4 : schéma fonctionnel du système de spectrophotométrie proposé.....	17
Figure II-1: Flux de données IoT pour les applications en temps réel [7]	21
Figure II-2: Principales applications de l'IIoT dans différents secteurs industriels [10]	22
Figure II-3: les couches de système IoT [12]	23
Figure II-4: Architecture du système du projet sur l'état de l'eau [14].....	24
Figure II-5 : L'architecture IoT de ce système [15]	25
Figure III-1: schéma synoptique du système	28
Figure III-2: schéma des ports et composants de la raspberry pi 4 [16]	28
Figure III-3: Raspberry Pi.....	29
Figure III-4 : Connecteur GPIO Broche	29
Figure III-5: Circuit de base pour utiliser le TCS3200.....	30
Figure III-6 : circuit de commande des LED pour éclairer l'échantillon à analyser	30
Figure III-7: PHotodiode du TCS3200.....	32
Figure III-8 : Symbole d'une PHotodiode	32
Figure III-9: Jonction PN d'une PHotodiode	33
Figure III-10: schéma de connexion du Raspberry PI avec TCS3200 schéma présenté dans la figure III-5 et III-6	34
Figure III-11 : affichage des fréquences dans le terminal lors de l'exécution du script	41
Figure III-12 : interface Django sur le pc local	42
Figure III-13 : interface Django sur un appareil via une adresse IP locale.....	42
Figure III-14 : interface Django affichée sur un smartphone	43
Figure III-15 : modèle 3D du boîtier réalisé sous Fusion360	44
Figure III-16 : visualisation interactive du boîtier HydroPro Scan	44

Liste des tableaux

Tableau 1: comparaison entre IIoT et IoT [9]	21
Tableau 2: les composants matériels/logiciels [13]	23

Liste des abréviations

GPIO : General Purpose Input / Output

IIOT : Industrial Internet of Things

IOT : Internet of Things

BMC : Business Model Canva

AI : Artificial Intelligence

HTML : Hyper Texte Markup Language

LED : Light Emitting Diode

OS : Operationg System

PWM : Pulse Width Modulation

RVB : Rouge Vert Bleu

UV : Ultraviolet

IP : Internet Protocol (Adresse IP)

QR Code : Quick Response Code

Introduction

La surveillance de la qualité de l'eau est devenue une préoccupation environnementale et industrielle critique à mesure que la pollution, l'industrialisation et les exigences réglementaires augmentent. Il est clair qu'actuellement les méthodes traditionnelles d'échantillonnage manuel ne répondent pas aux besoins de la prise de décision en temps réel, ce qui nécessite le développement de solutions Internet des objets de qualité Industrielle : IIoT (Industrial Internet of Things). En effet, l'intégration de d'une plateforme de qualité l'Internet industriel des objets permet une surveillance continue et économique des paramètres critiques tel que le PH, Cl, turbidité, oxygène dissous, etc.) via des capteurs en réseau et des analyses basées sur l'intelligence. Cette révolution technologique améliore la protection de l'environnement et la conformité de l'industrie en fournissant des flux de données exploitables. Face à ces défis, une solution complète dédiée à la mesure de la qualité de l'eau nécessite l'utilisation de plusieurs types de capteurs :

- Le ph mesuré par des électrodes en verre indiquant l'acidité/l'alcalinité,
- La turbidité mesurée en ntu à l'aide de capteurs optiques,
- Le chlore libre à l'aide de capteurs ampérométriques pour surveiller la désinfection,
- L'oxygène dissous mesuré à l'aide de capteurs électrochimiques,
- La conductivité à l'aide de capteurs à base d'électrodes pour évaluer la concentration d'ions,
- La température à l'aide de thermistances qui influent sur tous les processus chimiques/biologiques.

Bien que ces capteurs fournissent des mesures précises, leur application généralisée dans l'IIoT se heurte à des limites notamment, consommation d'énergie importante, des coûts d'intégration et fabrication élevés, des procédures d'étalonnage complexes, avec le besoin d'une maintenance hebdomadaire ou mensuelle.

Nous proposons un système dédié à la surveillance de l'eau basés sur les phénomènes optiques toutes en exploitant une architecture IIoT offrent des avantages complets.

- Surveillance des paramètres en temps réel ph, turbidité et chlore, avec un temps de réponse inférieur à une minute.
- Réduction des coûts d'exploitation grâce à l'échantillonnage automatisé et à la maintenance prédictive.
- Prise de décision basée sur les données grâce à des analyses basées sur le cloud et des alertes de seuil.
- Accès à distance pour les opérateurs grâce à des tableaux de bord standardisés.
- Amélioration de la conformité réglementaire avec des modèles de rapports automatisés.
- Prévention des anomalies grâce à des algorithmes de corrélation multi-paramètres.

Notre mémoire est organisé en quatre Chapitres. Le premier chapitre aborde les techniques et technologies de la spectrophotométrie. Le second chapitre est dédié à la technologie de l'internet des objets industriel IIoT les couches protocolaires, importance et avantages et présentant les domaines d'applications. Dans le troisième chapitre nous présentons notre conception matériel et logiciel de la

solution dédiée à la mesure de la qualité de l'eau précisément PH, Chlore et turbidité, le prototype ainsi réalisé se présente comme le premier produit à commercialiser. Le quatrième et dernier chapitre présente le plan commercial pour une éventuelle entreprise qui va commercialiser de notre produit.

CHAPITRE I :
MESURE DE LA QUALITE DE
L'EAU PAR SPECTROMETRIE

I.1. Introduction

Dans le cadre de notre projet, nous développons un spectrophotomètre connecté pour l'analyse de la qualité de l'eau, avec un coût de revient très faible. Il s'agit d'un dispositif avec une précision des mesures qui permet d'affirmer ou mettre en question la potabilité de l'eau de manière fiable du fonctionnement et l'adaptabilité du système aux contraintes du monde réel. L'ensemble qui est une combinaison d'une couche physique étroitement liée à un outil logiciel, et il est donc essentiel de comprendre les fondements de la spectrométrie dédiée à l'analyse de la qualité de l'eau qui est présentée ici comme préliminaire au mode d'emploi de notre système et sa mise en œuvre.

I.2. La spectrophotométrie

Chaque composé présent dans la nature a la propriété d'absorber, de transmettre ou de réfléchir la lumière (radiation électromagnétique) à une certaine longueur d'onde. Cette propriété des composés permet de les mesurer quantitativement à l'aide de techniques spectrophotométriques. La spectrophotométrie est une technique qui permet de mesurer l'interaction de la lumière avec les matériaux. Lorsque la lumière tombe sur un matériau, elle peut être réfléchie, transmise, diffusée ou absorbée et, en même temps, le matériau sur lequel la lumière est tombée peut émettre de la lumière absorbée à différentes fréquences. [1]

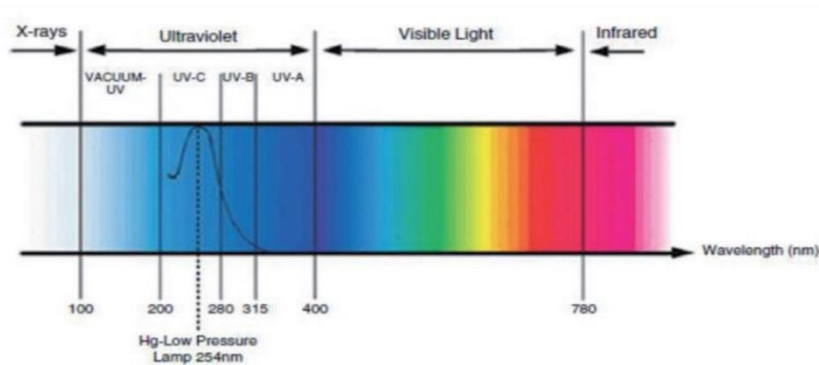


Figure I-1: spectre électromagnétique

Cela est dû à l'énergie gagnée par la lumière (par exemple, électroluminescence) ou à sa température (incandescence). Différents types de spectroscopie et de spectrophotométrie sont des techniques bien connues et largement utilisées pour identifier et quantifier les composés dans le domaine de la recherche ainsi que dans les laboratoires industriels et chimiques. Par exemple, en chimie et en pharmacie, la spectrophotométrie UV-visible est une technique de base pour analyser les échantillons sur la base de l'application de la loi de Beer-Lambert Bouguer [2]. En biochimie et en biologie moléculaire, l'analyse spectrophotométrique est essentielle pour déterminer la concentration en biomolécules d'une solution et est utilisée de manière omniprésente pour déterminer la concentration d'ADN, d'ARN ou de protéines. Dans les laboratoires cliniques, la spectrophotométrie manuelle et automatisée est largement utilisée pour la détermination des échantillons de sang, d'urine et de liquides organiques. Plusieurs types de

méthodes spectroscopiques et spectrophotométriques sont utilisés pour analyser les échantillons. Parmi elles, deux méthodes principales sont très utilisées : la spectrophotométrie d'absorption, qui est basée sur l'absorption du rayonnement à une longueur d'onde spécifique de la lumière pour obtenir le spectre d'absorption, et la spectrophotométrie UV-visible, qui appréhende la réflectance de spectres spécifiques d'un matériau donné dans la gamme UV et visible du spectre de rayonnement électromagnétique. [3]

I.3 Conception d'un spectrophotomètre

Les principaux composants d'un spectrophotomètre sont les suivants :

- Une source lumineuse qui génère une large bande de rayonnement électromagnétique dans le spectre UV-visible.
- Un dispositif de dispersion qui sépare le rayonnement à large bande en longueurs d'onde.
- Une surface d'échantillon, à travers laquelle la lumière passe ou sur laquelle la lumière se reflète.
- Un ou plusieurs détecteurs qui mesurent l'intensité du rayonnement réfléchi ou transmis.
- D'autres composants optiques, tels que des lentilles, des miroirs ou des fibres optiques, qui transmettent la lumière à l'intérieur de l'instrument. [4]

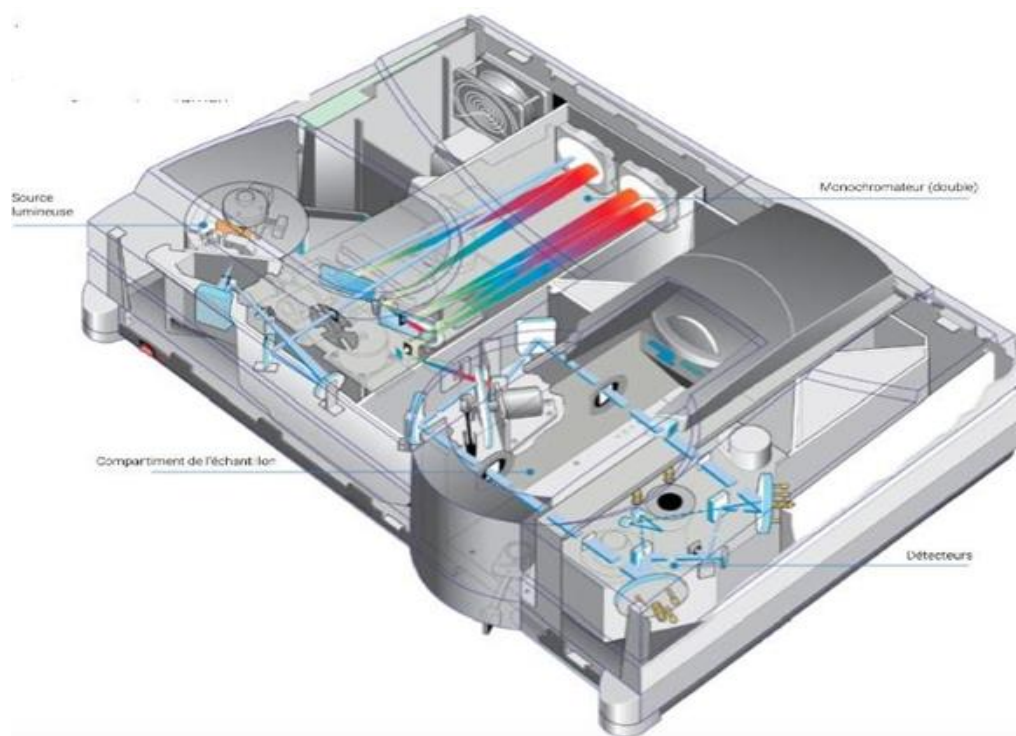


Figure I-2 : Schéma de la disposition interne d'un spectrophotomètre UV-Vis-NIR Agilent Cary 5000

I.4 Sources lumineuses

Dans l'idéal, la source lumineuse devrait produire une intensité constante sur toutes les longueurs d'onde avec un faible bruit et une donnée de sortie stable sur

Le long terme. Malheureusement, ce type de source n'existe pas. Deux différentes sources de lumière ont été utilisées historiquement dans les spectrophotomètres UV-Vis :

- La lampe à arc au deutérium a été utilisée pour fournir un bon continuum d'intensité dans le domaine UV et une intensité utile dans le domaine visible.
- La lampe halogène au tungstène permettait d'obtenir une bonne intensité sur la totalité de la gamme visible et sur une partie du spectre UV.
- Plus récemment, le recours à une lampe flash au xénon unique s'est répandu. Elle offre de réels avantages par rapport à l'utilisation de deux lampes conventionnelles.

I.5 Détecteur

Un détecteur convertit la lumière provenant de l'échantillon en signal électrique. Tout comme la source lumineuse, le détecteur devrait donner une réponse linéaire sur une large gamme de longueurs d'onde, avec un faible bruit et une grande sensibilité. Les spectrophotomètres contiennent normalement soit un détecteur de type photomultiplicateur, soit un détecteur à photodiode. Les systèmes de haute performance peuvent comporter d'autres détecteurs spécialisés permettant d'améliorer la couverture en matière de longueurs d'onde et la sensibilité. Chaque détecteur présente une sensibilité et une gamme de longueurs d'onde différentes. Lorsqu'il possède plusieurs détecteurs, le système bascule sur le détecteur correspondant à la gamme de longueurs d'onde requise pour la mesure.

I.6 Monochromateur

Toutes les sources lumineuses produisent une lumière blanche à large spectre.

Pour réduire cette émission à une bande de longueurs d'onde sélectionnée, la lumière doit passer à travers un monochromateur. Le monochromateur est composé des éléments suivants :

- Une fente d'entrée,
- Un appareil de dispersion, qui disperse la lumière en différentes longueurs d'onde (Comme un arc-en-ciel) et permet de sélectionner une bande particulière de longueurs d'onde
- Une fente de sortie à travers laquelle passent les longueurs d'onde choisies avant de se diriger sur l'échantillon.

Pour faire simple, le monochromateur peut être considéré comme une pièce avec une fenêtre qui la baigne de lumière. La lumière du soleil arrive sur un prisme qui sépare la lumière blanche en un arc-en-ciel. Cet arc-en-ciel parvient jusqu'à une autre fenêtre située à l'autre bout de la pièce. En tournant le prisme, on peut faire passer par cette deuxième fenêtre une lumière de différentes couleurs, c'est à dire de différentes longueurs d'onde.

Dans l'idéal, la lumière sortant du monochromateur ne comporte qu'une seule longueur d'onde, mais en pratique, on obtient toujours une bande de longueurs d'onde.

Les appareils de dispersion de la plupart des spectrophotomètres actuellement disponibles sur le marché sont des réseaux holographiques.

Ces composants optiques, constitués de verre, possèdent à leur surface des rainures extrêmement étroites, gravées avec précision. Les dimensions des rainures sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière à disperser. Pour finir, un revêtement d'aluminium est appliqué pour créer une surface réfléchissante.

La lumière arrivant sur le réseau interfère, est diffractée et réfléchié selon différents angles, en fonction de la longueur d'onde. Les réseaux holographiques assurent une dispersion angulaire linéaire avec la longueur d'onde et ne sont pas sensibles à la température. Toutefois, ils réfléchissent la lumière sous forme de plusieurs ordres, qui se chevauchent.

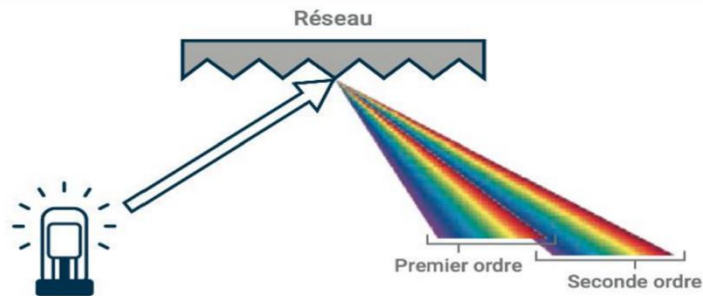


Figure I-3 : Représentation de la dispersion par un réseau holographique de la lumière blanche.

I.7 Compartiment de l'échantillon :

Le compartiment de l'échantillon d'un spectrophotomètre UV-Vis consiste en général en un caisson de couleur noir équipé d'un couvercle de fermeture. Le noir mat à l'intérieur du compartiment contribue à absorber la lumière parasite susceptible d'y pénétrer. Dans son compartiment, l'échantillon est positionné de façon à être traversé par le faisceau provenant du monochromateur.

Il existe des cuves en verre, en plastique et en quartz pour les échantillons liquides. Les échantillons solides sont maintenus en position à l'aide d'un support fixé à la partie inférieure du compartiment de l'échantillon. La lumière peut également être évacuée hors du compartiment de l'échantillon à l'aide de fibres optiques. Ces fibres optiques sont utiles pour la mesure d'échantillons particulièrement grands, chauds, froids, radioactifs ou dangereux.

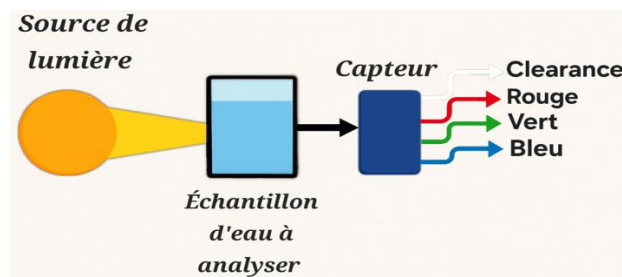


Figure I-4 : schéma fonctionnel du système de spectrophotométrie proposé

I.8 Conclusion:

Ce chapitre a expliqué les principes optiques de base de la spectrophotométrie appliquée à l'analyse de l'eau : Le rôle de la source lumineuse, la sélection de la longueur d'onde, la cellule d'échantillonnage et le détecteur, et la façon dont chacun affecte la précision de la mesure. Ces principes expliquent les limites et les seuils de performance que tout spectrophotomètre de qualité de l'eau doit respecter, quel que soit son coût ou son facteur de forme. Après avoir posé ces bases scientifiques, la thèse peut maintenant s'appuyer sur celles-ci pour discuter des options de mise en œuvre dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II :
IIOT : L'INTERNET INDUSTRIEL
DES OBJETS

II.1. Introduction

Avec l'émergence de l'Internet des objets (IoT), de nombreux secteurs ont connu une transformation numérique majeure. Lorsque cette technologie est appliquée dans des contextes industriels, elle donne naissance à ce qu'on appelle l'Internet Industriel des objets (IIoT). C'est l'intégration d'objets connectés au sein d'environnements industriels pour collecter, transmettre et exploiter des données en temps réel afin d'optimiser les processus.

Contrairement à l'IoT traditionnel, l'IIoT met l'accent sur la fiabilité, la sécurité, la précision et la continuité des activités. Cela a ouvert la voie à des systèmes intelligents dans les secteurs de la fabrication, de l'énergie et de la logistique, mais aussi dans des domaines plus critiques tels que la gestion de la qualité de l'eau.

Dans ce contexte, ce chapitre a pour objectif de présenter les fondamentaux de l'IoT et de l'IIoT, leur architecture, leurs composants matériels et logiciels, ainsi que leurs principales applications, en mettant particulièrement l'accent sur leur utilité dans le domaine du suivi environnemental, plus précisément celui de la qualité de l'eau.

II.2. Principe IoT :

2.1 Définition de l'IoT

L'Internet des objets (IoT) est un réseau d'objets physiques équipés de capteurs, de processeurs et de technologies de communication qui se connectent et échangent des données via l'Internet. Un dispositif IoT transforme des capteurs/actionneurs ordinaires en systèmes intelligents capables de fonctionner de manière autonome via un monitoring distant. Les applications majeures dans de nombreux domaines tels que l'agriculture intelligente, les soins de santé et la surveillance de l'environnement.[5]

2.2 Comment fonctionne l'Internet des objets (flux de données)

Un système IoT typique comporte quatre phases principales [6] :

- **Mesure** : via des capteurs pour traduire des grandeurs physiques.
- **Transmission** : Les données sont transmises à l'aide de protocoles de communications (Wi-Fi, Bluetooth...).
- **Traitement** : Des applications Cloud souvent basé sur l'intelligence artificielle traitent les mesures.
- **Application** : L'analyse sur les données sont envoyées aux utilisateurs finaux ou aux pupitres de contrôle.

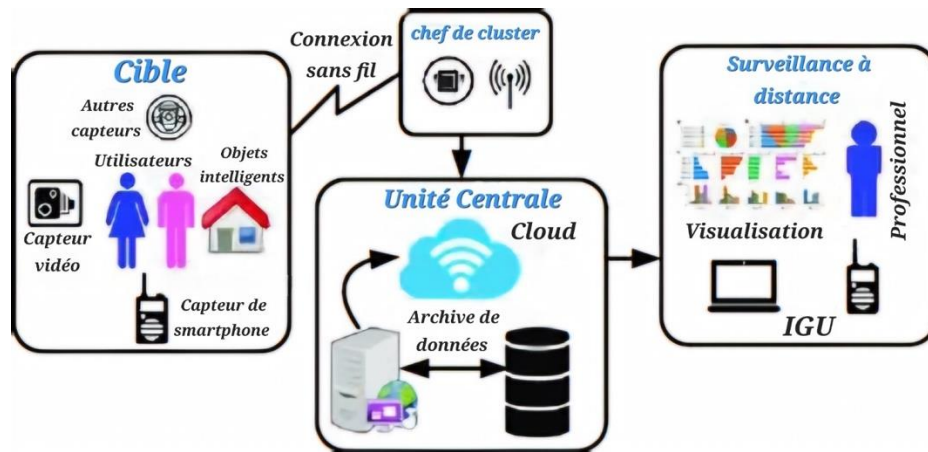


Figure II-1: Flux de données IoT pour les applications en temps réel [7]

II.3 L'Internet Industriel des Objets IIOT

3.1 Définition de l'IIoT

L'Internet industriel des objets (IIoT) est une sous-catégorie de l'IoT spécialement conçue pour les applications industrielles. Alors que l'IoT se concentre sur la connectivité au niveau du consommateur, l'IIoT se concentre sur la fiabilité critique, le traitement des données en temps réel et la cybersécurité robuste pour les technologies opérationnelles. [8]

Cette adaptation industrielle permet des applications telles que la maintenance prédictive et le contrôle automatisé de la production.

3.2 Comparaison entre IIoT et l'IoT :

Le tableau I.1 résume les différences les plus importantes entre l'IIoT et l'IoT :

Tableau 1: comparaison entre IIoT et IoT [9]

Caractéristiques	IIoT	IoT
Traitement	Temps réel avec latence déterministe (<10ms)	Temps quasi réel acceptable
Sécurité	Cryptage de bout en bout (protocoles OT comme OPC UA)	Cryptage TLS/SSL de base
Fiabilité	Temps de fonctionnement de 99,99 % avec redondance	Temps de fonctionnement toléré de 90-95 %
Volume de données	Flux de données de capteurs à haute fréquence	Données périodiques/intermittentes

3.3 Applications de l'IIoT

Voici quelques exemples d'applications IIoT dans différents domaines [8] :

- **Fabrication intelligente** : contrôle automatisé de la chaîne de production avec contrôle de la qualité en temps réel.
- **Gestion de l'énergie** : distribution dynamique de l'énergie et contrôle des performances des équipements.
- **Agriculture et surveillance de l'environnement** : systèmes d'analyse de la qualité de l'eau couplés à une gestion des cultures de précision.
- **Infrastructure de soins de santé** : suivi des actifs médicaux et prise en charge du télédiagnostic.
- **Systèmes de transport** : maintenance prédictive des flottes associée à l'optimisation de la logistique.
- **Infrastructure urbaine (Smart Cities)** : réseaux intelligents de services publics intégrant une surveillance efficace des services.



Figure II-2: Principales applications de l'IIoT dans différents secteurs industriels [10]

II.4 Architecture d'un système IOT

4.1 Architecture en couches :

L'internet des objets (IoT) utilise généralement une architecture multicouche pour gérer la complexité du système, chaque couche remplissant des fonctions distinctes. La couche de perception de base est constituée de capteurs et d'actionneurs physiques qui interagissent avec l'environnement pour collecter des données brutes. Ces données sont transmises par la couche réseau à l'aide de protocoles de communication normalisés tels que Wi-Fi ou LoRaWAN. La couche intergicielle traite et stocke ensuite ces informations, souvent sur la base de plateformes d'informatique en nuage ou en périphérie. Les données traitées deviennent disponibles pour les utilisateurs finaux via la couche application par le biais de tableaux de bord ou d'interfaces mobiles, tandis que la couche métier applique des analyses avancées et l'IA pour prendre des décisions. Cette décomposition hiérarchique, comme le montre la figure 7,

permet une conception modulaire, une évolutivité et une mise en œuvre indépendante de la sécurité entre les couches. [11]

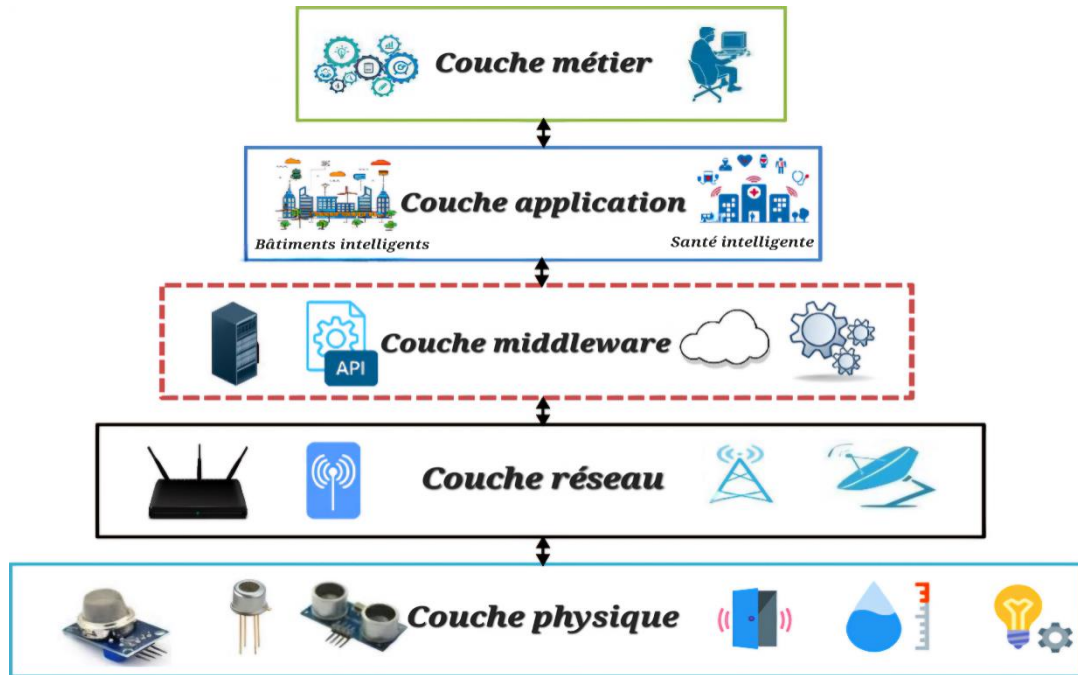


Figure II-3: les couches de système IoT [12]

4.2 Les composants matérielles et logicielles d'un système IoT

L'architecture du système IoT repose sur deux piliers principaux : les composants matériels pour l'interaction physique et les composants logiciels pour la gestion des données, classés sur le tableau I.2 suivant :

Tableau 2: les composants matériels/logiciels [13]

Composants matériels (Hardware)	Composants logiciels (Software)	Exemples
Dispositifs de détection	Systèmes d'exploitation intégrés	TCS3200 (capteur de couleur), Raspberry Pi OS
Recueillir des données environnementales	Gérer les ressources matérielles	
Unités de traitement	Protocoles de communication	Raspberry Pi , Wi-Fi
Traiter les données brutes des capteurs	Permet la connectivité des appareils	
Actionneurs	Analyse des données	Servo moteur, TensorFlow
Exécuter des actions physiques	Extraire des informations de données	

II.5 Application IIOT pour la qualité de l'eau :

5.1 Utilisation Rurale

Un système IIoT rentable pour surveiller la qualité de l'eau. Le système proposé, basé sur l'IoT, offre un moyen peu coûteux et efficace de surveiller la qualité de l'eau dans les zones rurales. Il se concentre sur la mesure de facteurs critiques tels que le PH, la turbidité et la température à l'aide de capteurs de base couplés à un microcontrôleur, et les données sont transmises à une plateforme cloud pour une visualisation en temps réel. L'objectif du système est d'assurer une surveillance continue et automatisée, en réduisant le besoin d'échantillonnage manuel tout en améliorant le temps de réponse en cas d'anomalie [14]. La structure globale du système est présentée dans la figure 8 ci-dessous :



Figure II-4: Architecture du système du projet sur l'état de l'eau [14]

5.2 Utilisation Industrielle

IIoT dans la qualité de l'eau pour l'industrie minière. Ce système IIoT est conçu pour la gestion de la qualité de l'eau dans les contextes miniers, garantissant le respect des normes environnementales. Il intègre des capteurs industriels, de l'Edge computing et de l'analytique cloud en temps réel pour surveiller des paramètres tels que le ph, l'ORP et la conductivité électrique. L'architecture prend en charge l'accès à distance, la maintenance prédictive et les systèmes d'alerte automatisés pour détecter efficacement les risques de contamination de l'eau [15]. L'architecture du système proposé est illustrée dans la figure II-5 ci-dessous :

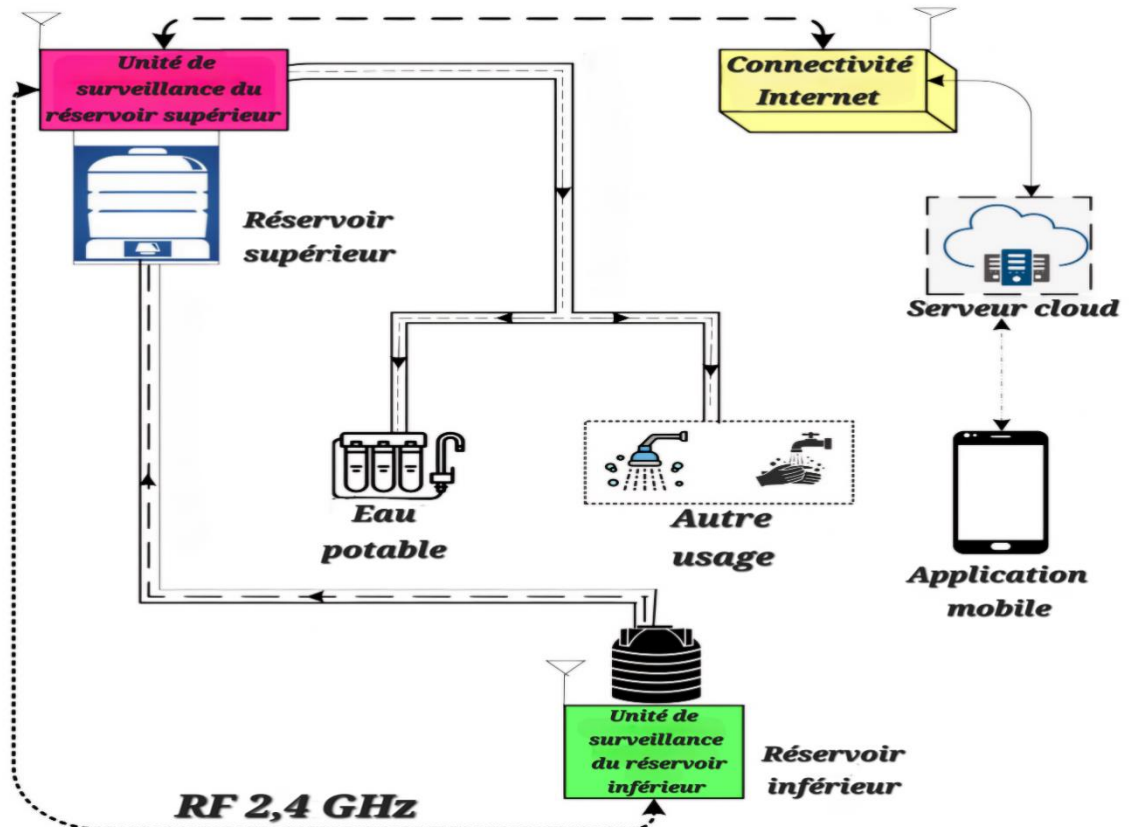


Figure II-6 : L'architecture IoT de ce système [15]

II.6 Conclusion

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux liés à l'Internet industriel des objets (IIoT), en partant du principe général de l'IoT et en explorant ensuite son application industrielle. Nous avons mis en évidence l'architecture typique d'un système IoT, ses couches fonctionnelles, ainsi que les composants matériels et logiciels essentiels à son fonctionnement. Ensuite, une attention particulière a été accordée à l'application de l'IIoT dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'eau, en abordant les paramètres couramment surveillés, les avantages offerts par cette technologie et quelques exemples concrets d'applications réelles.

Cette base théorique pose les bases nécessaires pour comprendre la mise en œuvre technique de notre solution. Le prochain chapitre sera consacré à la description détaillée du système embarqué, présentant tous les composants physiques et leur disposition dans un contexte d'application intelligente.

CHAPITRE III :
DEVELOPPEMENT DU SYSTEME
IIOT POUR LA MESURE DE LA
QUALITE DE L'EAU

III.1. Introduction

Dans le cadre de notre projet d'analyse intelligente de la qualité de l'eau, ce chapitre marque la transition de la conception théorique à la mise en œuvre réelle du système. Nous présentons les éléments matériels et logiciels nécessaires à la réalisation du prototype, tout en détaillant les étapes essentielles de développement, configuration, connexion et interfaçage. Ce travail pratique permet de mettre en œuvre les principes susmentionnés, préparant le terrain pour les phases d'essai, de validation et de fonctionnement du dispositif de mesure de la qualité de l'eau : PH, Chlore et turbidité.

III.2. Architecture matérielle proposée

L'architecture proposée représente une structure simplifiée mais pratique pour notre système de surveillance de la qualité de l'eau. Elle intègre un ensemble de modules matériels et de communication avec un système de contrôle embarqué pour l'acquisition, le traitement et la communication des données en temps réel.

Au cœur du système se trouve une carte de développement Raspberry Pi, qui fait office d'ordinateur industriel embarqué. Elle est chargée d'obtenir les valeurs RVB du système d'analyse optique, qui analyse les échantillons d'eau dans une petite éprouvette transparente. Cette configuration est utilisée pour estimer des paramètres clés tels que le PH, la turbidité et la concentration de chlore, à l'aide d'algorithmes que nous avons développés.

Le système fonctionne avec une alimentation de 5V et est conçu pour être flexible en termes de technologies de connectivité. Il prend en charge les protocoles Wi-Fi, Bluetooth et Ethernet pour la connectivité, ce qui lui permet de s'adapter à différents environnements de déploiement.

Une fois l'analyse de la qualité de l'eau est traitée localement, les résultats sont accessibles directement via l'interface réseau définie et la pile protocolaire Intranet. De là, les utilisateurs peuvent accéder aux mesures via un navigateur web sur leur téléphone ou leur ordinateur.

Cette architecture modulaire facilite les mises à niveau, l'évolutivité et la surveillance en temps réel, tout en simplifiant la mise en œuvre du prototype.

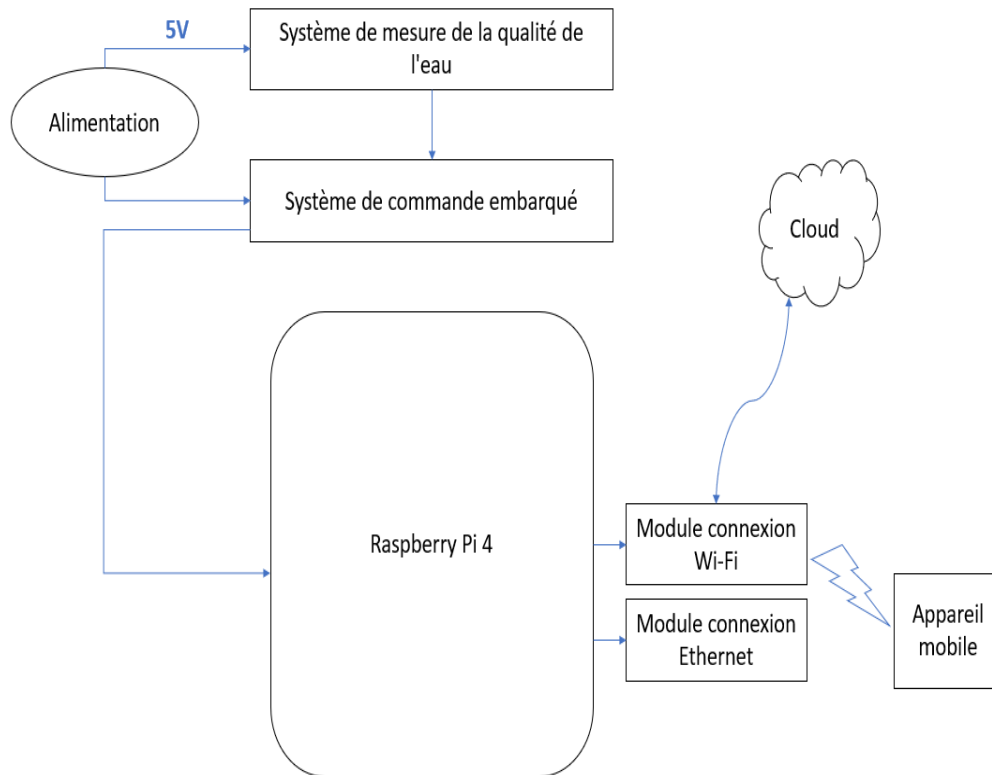


Figure III-1: schéma synoptique du système

2.1 Unité de traitement et de contrôle

2.1.1 Présentation générale

Nous avons choisi le Raspberry Pi comme unité de traitement, car il s'agit d'un nano ordinateur flexible et personnalisable, idéal pour le développement et l'intégration de solutions électroniques embarquées de qualité industrielle grâce à sa puissance de traitement et sa connectivité avancée.



Figure III-2: schéma des ports et composants de la Raspberry Pi [16]

Dans notre projet, nous allons utiliser le Raspberry Pi en expliquant ses principales caractéristiques et son architecture matérielle.

2.1.2 Raspberry Pi

Le Raspberry Pi est un micro-ordinateur qui peut être relié à un écran, à un ensemble de clavier et souris, et propose des interfaces Wi-Fi, Bluetooth et Ethernet.

Il opère sur une carte micro-SD et utilise un système d'exploitation basé soit sur Linux, soit sur Windows 10 IoT. Il est proposé sans boîtier, alimentation, clavier, écran ni souris afin de réduire le prix et encourager l'usage d'équipements recyclés. [18]



Figure III-3: Raspberry Pi

- **Broches GPIO**

Permettent la connexion de capteurs, modules et composants électroniques divers Flexibilité maximale pour les projets de prototypage, domotique, robotique, etc.

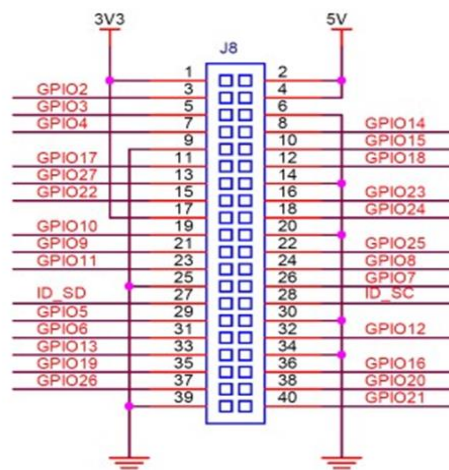


Figure III-4 : Connecteur GPIO Broche

2.2 Capteur de mesure optique

2.2.1 Capteur de couleur TCS3200 (color sensor)

Ce dispositif est un convertisseur de couleur programmable en lumière-fréquence, combinant des photodiodes au silicium configurables et un convertisseur courant fréquence sur une seule puce intégrée monolithique CMOS. Ce capteur de couleur programmable produit une fréquence basée sur la couleur détectée et est composé de quatre filtres (un filtre pour chaque teinte : rouge, vert, bleu et sans filtre).

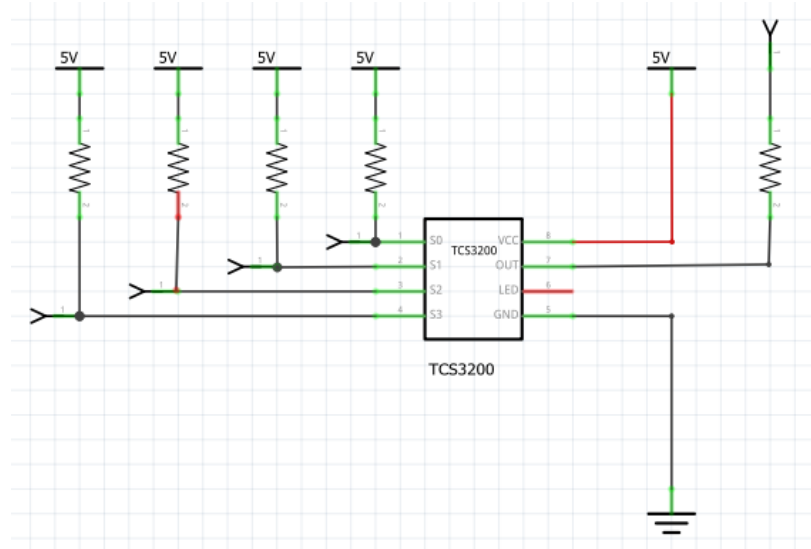


Figure III-5: Circuit de base pour utiliser le TCS3200

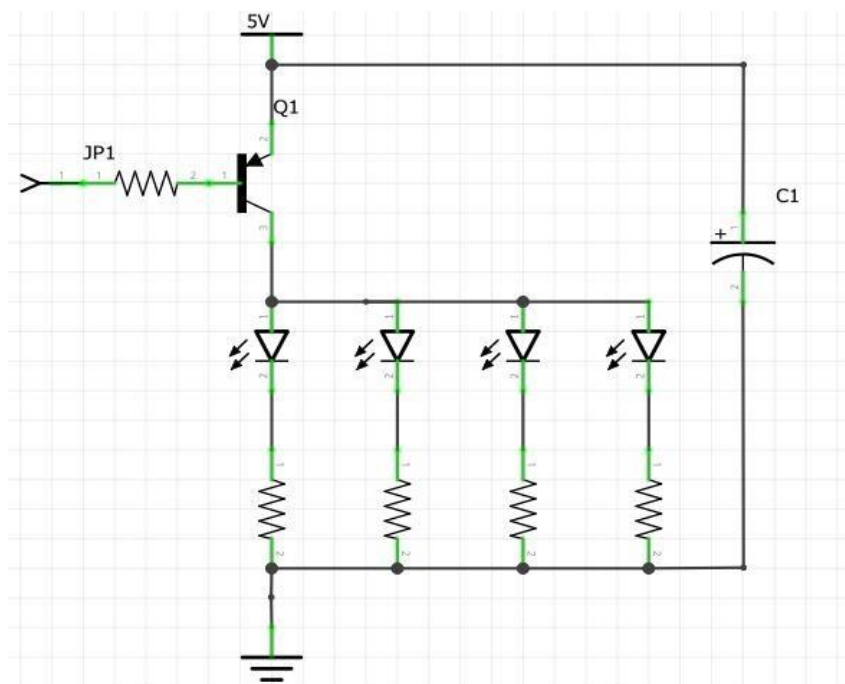


Figure III-6 : circuit de commande des LED pour éclairer l'échantillon à analyser

Le capteur de couleur TCS3200 fonctionne en évaluant l'intensité du spectre des couleurs à l'aide d'une matrice de photodiodes. Cette matrice se compose de 16 photodiodes pour chaque couleur primaire (rouge, vert, bleu), plus 16 photodiodes non filtrées. En soumettant l'objet dont la couleur doit être identifiée à une source lumineuse, le détecteur est capable d'évaluer les fréquences des différentes teintes réfléchies par l'objet. Sur la base de ces fréquences observées, l'appareil détermine la couleur de l'objet. [19]

2.2.2 Comment le capteur identifie la couleur

- Lumière sur l'objet : Le capteur utilise la lumière ambiante ou ses DEL intégrées (le cas échéant) pour éclairer la surface à examiner.
- Retour de lumière : L'objet réfléchit la lumière en fonction de sa couleur. Par exemple, un objet rouge réfléchit principalement la lumière rouge.
- Filtrage et détection : Le capteur active successivement des photodiodes rouge, vert et bleu pour quantifier la quantité de lumière réfléchie dans chaque gamme spectrale.
- Transformation en signal numérique : La lumière captée est convertie en un signal de fréquence : plus elle est forte, plus la fréquence est élevée.
- Examen des valeurs RVB : Le microcontrôleur interprète ces fréquences pour chaque couleur et en déduit la valeur RVB de l'objet examiné.
- Détermination de la couleur : En comparant les valeurs RVB à des normes (ou à l'aide d'un algorithme), on est en mesure d'identifier la couleur principale de l'objet

2.2.3 Caractéristiques

- Telles sont les principales caractéristiques de ce capteur. [25]
- Tension de fonctionnement : 2.7v à 5.5v
- Interface : digital TTL
- Programmable pour différentes échelles de fréquence de sortie
- Conversion haute résolution de l'intensité lumineuse en fréquence
- Fonction de mise hors tension
- Température de fonctionnement : -40°C à 85°C
- Taille : 28.4 * 28.4 mm

2.3 Les photodiodes

Le capteur TCS3200 est essentiellement constitué d'une photodiode. Voyons comment fonctionne cette photodiode :

Les photodiodes sont une catégorie de diodes qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Leur fonctionnement est exactement l'inverse de celui des LED, qui sont également des diodes, mais qui

convertissent l'électricité en énergie lumineuse. Les photodiodes peuvent également être utilisées pour détecter la luminosité de la lumière [20].

Une photodiode est une diode à jonction PN qui consomme de l'énergie lumineuse pour produire un courant électrique [21]. Elle est également appelée photodétecteur, détecteur de lumière et photocapteur. Les photodiodes sont conçues pour fonctionner en polarisation inverse. Les matériaux typiques des photodiodes sont le silicium, le germanium et l'arséniure d'indium et de gallium.

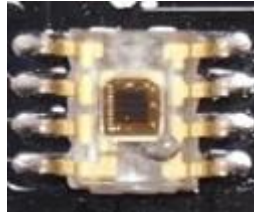


Figure III-7: Photodiode du TCS3200

La structure PIN (de type p, intrinsèque et de type n) est principalement utilisée pour construire la photodiode au lieu de la structure de jonction p-n (de type p et de type n) parce que la structure PIN offre un temps de réponse rapide. Les photodiodes PIN sont principalement utilisées dans les applications à grande vitesse [22].

Le symbole de la photodiode est similaire à celui de la diode normale à jonction p-n, sauf qu'il contient des flèches frappant la diode. Les flèches qui frappent la diode représentent la lumière ou les photons.

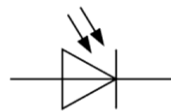


Figure III-8 : Symbole d'une Photodiode

2.3.1 Principe de fonctionnement de la Photodiode

Une photodiode est soumise à des photons sous forme de lumière qui affectent la génération de paires électron-trou. Si l'énergie des photons qui tombent ($h\nu$) est supérieure à l'écart énergétique (E_g) du matériau semi-conducteur, des paires électron-trou sont créées près de la région d'épuisement de la diode. Les paires électron-trou créées sont séparées l'une de l'autre avant de se recombiner en raison du champ électrique de la jonction. La direction du champ électrique dans la diode force les électrons à se déplacer vers le côté n et, par conséquent, les trous se déplacent vers le côté p. L'augmentation du nombre d'électrons du côté n et de trous du côté p entraîne une augmentation de la force électromotrice. Maintenant, lorsqu'une charge externe est connectée au système, on observe un flux de courant à travers elle [23].

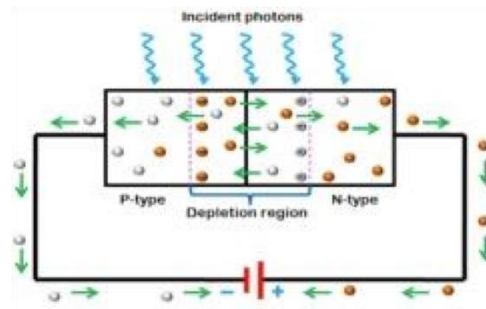


Figure III-9: Jonction PN d'une Photodiode

Plus la force électromotrice créée est importante, plus le flux de courant est important. L'ampleur de la force électromotrice créée dépend directement de l'intensité de la lumière incidente. Cet effet de la variation proportionnelle du photocourant avec le changement d'intensité de la lumière peut être facilement observé en appliquant une polarisation inverse.

Comme les photodiodes génèrent un flux de courant directement en fonction de l'intensité lumineuse reçue, elles peuvent être utilisées comme photodétecteurs pour détecter des signaux optiques. Des lentilles et des filtres optiques intégrés peuvent être utilisés pour améliorer la puissance et la productivité d'une photodiode.

2.3.2 Applications de la photodiode

- Les photodiodes sont utilisées dans des applications quotidiennes simples. La raison de leur utilisation fréquente est la réponse linéaire de la photodiode à la lumière [24].
- Les photodiodes, à l'aide d'optocoupleurs, assurent l'isolation électrique. Lorsque deux circuits isolés sont éclairés par la lumière, les optocoupleurs sont utilisés pour coupler le circuit optiquement. Les optocoupleurs sont plus rapides que les dispositifs conventionnels.
- Les photodiodes sont utilisées dans l'électronique de sécurité, comme les détecteurs d'incendie et de fumée.
- Les photodiodes sont utilisées dans de nombreuses applications médicales. Elles sont utilisées dans les instruments qui analysent les échantillons, les détecteurs pour la tomographie assistée par ordinateur et également dans les moniteurs de gaz sanguin.
- Les photodiodes sont utilisées dans les panneaux solaires.
- Les photodiodes sont utilisées dans les circuits logiques.
- Les photodiodes sont utilisées dans les circuits de détection.
- Les photodiodes sont utilisées dans les circuits de reconnaissance de caractères.
- Les photodiodes sont utilisées pour mesurer avec précision l'intensité de la lumière dans la science et l'industrie.
- Les photodiodes sont plus rapides et plus complexes que les diodes à jonction PN normales et sont donc fréquemment utilisées pour la régulation de l'éclairage et la communication optique.

III.3 Schéma de connexion entre le capteur TCS3200 et le Raspberry PI

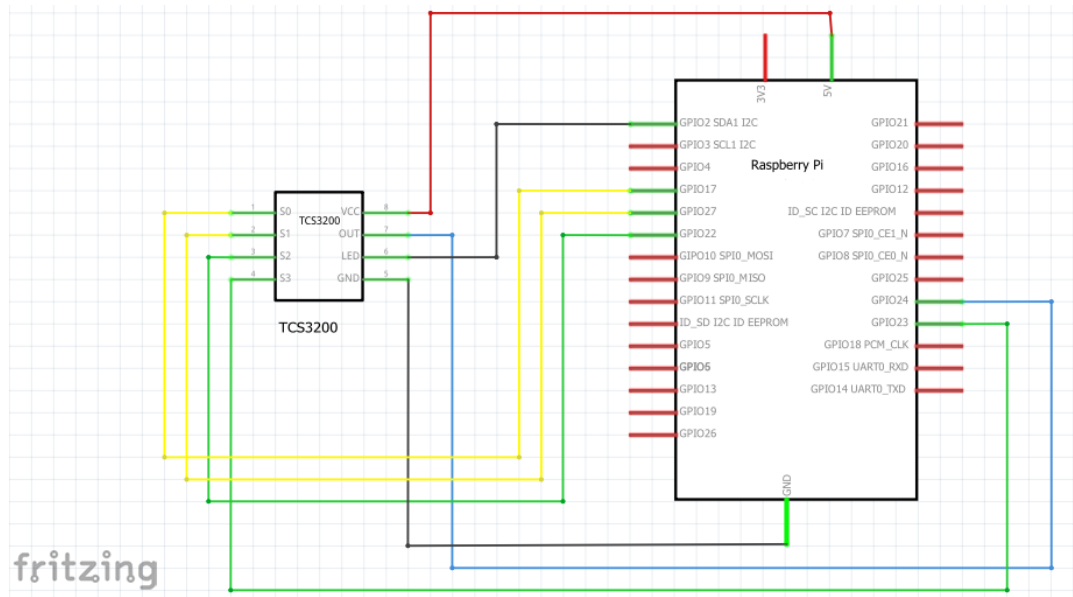


Figure III-10: schéma de connexion du Raspberry PI avec TCS3200 schéma présenté dans la figure III-5 et III-6

La figure ci-dessus illustre le schéma de connexion entre le capteur de couleur TCS3200 et le Raspberry Pi.

Les broches ont été choisies de manière à respecter la compatibilité avec les fonctions PWM, notamment pour le contrôle des LEDs RVB.

Les connexions sont établies comme suit :

- GND du capteur relié à la masse du Raspberry Pi.
- VCC du capteur relié au 5V du Raspberry Pi.
- OUT du capteur relié à GPIO 24 (pin 18) pour la lecture du signal de fréquence
- S0 / S1 connectés respectivement aux GPIO 17 (pin 11) et GPIO 27 (pin 13) pour le réglage de la fréquence de sortie.
- S2 / S3 connectés aux GPIO 22 (pin 15) et GPIO 23 (pin 16) pour la sélection des photodiodes (rouge, vert, bleu, clair).
- Broche LED connectée au GPIO 2 (pin 3) pour activer la LED blanche d'illumination
- Les LED RVB sont connectées aux broches GPIO 12 (pin 32) pour le bleu, GPIO 13 (pin 33) pour le vert et GPIO 19 (pin 35) pour le rouge, toutes compatibles avec PWM. Ce choix permet un contrôle analogique plus précis de l'intensité lumineuse des diodes, ce qui est essentiel pour la visualisation des résultats de mesure.

III.4 Solution logiciel développée pour l'analyse de la qualité de l'eau :

Le système intégré conçu pour mesurer la qualité de l'eau repose sur une architecture simple mais fonctionnelle, articulée autour d'un Raspberry Pi. Nous avons utilisé le langage Python pour lire les signaux du capteur de couleur TCS3200 afin de déterminer les composants de couleur : rouge, vert, bleu et clearance, d'un échantillon d'eau éclairé par quatre LED blanches.

L'architecture logicielle développée fonctionne comme suit :

- Configuration du Raspberry Pi : nous avons configuré les broches GPIO pour communiquer avec les sorties du capteur TCS3200. Nous avons utilisé le driver **pigpio**, qui permet une interaction directe temps réelle précise des broches et de la fréquence.
- Lecture de la fréquence couleur : un programme Python est utilisé pour contrôler le capteur et sélectionner les filtres de couleur, puis mesurer le temps entre les fronts montants et descendants du signal de sortie. Ce temps est converti en fréquence, qui indique l'intensité de la couleur sélectionnée.
- Interprétation des données : les valeurs RVB obtenues sont ensuite utilisées pour estimer les paramètres physiques et chimiques (ph, turbidité, chlore) à l'aide de modèles obtenus après calibrage.
- Affichage via une interface web : le système agit comme un serveur web développée à l'aide de Django. Cette interface permet d'afficher les fréquences en temps réel à partir d'un navigateur, éliminant ainsi le besoin d'un écran physique connecté au Raspberry Pi.

Ce processus local intégré, combiné à l'interface web accessible via Wi-Fi, constitue l'architecture logicielle complète que nous avons mise en œuvre dans le cadre de ce projet.

4.1 Configuration du Raspberry Pi et environnement de développement :

Pour la mise en œuvre logicielle du système intégré, nous avons commencé par configurer le Raspberry Pi comme processeur central. Voici les étapes spécifiques que nous avons suivies :

- **Installation et configuration du système d'exploitation :**

Nous avons installé le système d'exploitation **Raspberry Pi OS Lite** (version sans interface graphique) sur une carte **microSD**. Cette carte a été insérée dans le Raspberry Pi et démarrée.

Le système était accessible via le protocole **SSH (Secure Shell)**, sans écran ni clavier, à partir de notre pc connecté au même réseau Wi-Fi. Pour ce faire :

- Une fois démarré, l'adresse IP du Raspberry Pi a été détectée via Wi-Fi.
- La connexion a été établie via **VS Code** à l'aide de l'extension **Remote SSH**

- **Mise à jour du système :**

Une fois la connexion établie, nous avons mis à jour le système à l'aide des commandes suivantes :

```
sudo apt update  
sudo apt upgrade
```

- **création d'un environnement virtuel :**

Pour séparer les dépendances du projet, nous avons utilisé un environnement Python virtuel :

```
python3 -m venv WaterQPFE  
source ./WaterQPFE/bin/activate
```

- **Installation des bibliothèques nécessaires :**

Nous avons installé les bibliothèques suivantes :

```
pip install pigpio  
pip install django
```

igpio : pour la gestion avancée du GPIO, qui permet de configurer et de lire les fréquences du capteur TCS3200.

django : pour développer le serveur web intégrée.

- **Lancement du démon pigpio :**

Avant d'exécuter les scripts, le démon **igpiod** doit être lancé :

```
sudo igpiod
```

Avec cette configuration nous avons de développer et de tester les scripts directement sur le Raspberry Pi, tout en conservant un contrôle total à distance via notre ordinateur.

4.2 Connexion du Raspberry Pi au réseau Wi-Fi :

Dans notre projet, nous avons configuré le Raspberry Pi pour qu'il puisse se connecter à un réseau local via Wi-Fi. Étant donné que le système d'exploitation utilisé (Raspberry Pi OS Lite) ne dispose pas d'interface graphique, la connexion Wi-Fi a été préparée manuellement en exploitant les commande du network manager **nmcli**.

Ainsi, dès que le Raspberry Pi est mis sous tension, il se connecte automatiquement au réseau Wi-Fi correspondant, s'il est disponible dans l'environnement. Ce comportement permet de garantir l'autonomie du dispositif sans besoin d'intervention directe sur un écran ou un clavier.

En complément, une solution filaire via câble Ethernet a également été utilisée dans certains cas pour assurer la stabilité de la connexion, notamment en environnement de test. Le Raspberry Pi et le PC de développement sont alors connectés au même modem, permettant un accès direct via SSH.

L'adresse IP locale attribuée dynamiquement (exemple : 192.168.1.103) a été utilisée pour établir la connexion à distance à l'aide de VS Code, facilitant le développement et la gestion du système à distance.

Cette double configuration (Wi-Fi et Ethernet) offre une flexibilité importante, notamment en cas de changement d'environnement ou d'indisponibilité temporaire du réseau sans fil.

4.3 Test et validation du système :

Afin de valider le bon fonctionnement de notre système de mesure intelligent, plusieurs tests ont été réalisés sur le prototype complet, intégrant le capteur couleur TCS3200, le Raspberry Pi et le serveur web développés avec Django.

Ces essais avaient pour principal objectif de s'assurer :

- Les communications électroniques entre les composants sont établies correctement,
- Le code Python de lecture des fréquences pouvait être exécuté sans erreurs

- Les valeurs renvoyées par le capteur reflètent bien les différences colorimétriques entre les échantillons testés.

Des essais pratiques ont été réalisés en plaçant différentes solutions de couleur devant le capteur. Les fréquences rouges, vertes, bleues et clearance ont été mesurées puis interprétées par le système pour estimer les paramètres clés de la qualité de l'eau : ph, turbidité et concentration en chlore.

Bien que l'ensemble du processus d'optimisation du système soit en cours, les tests préliminaires ont confirmé que le processus de détection, de lecture et d'interprétation se déroule sans heurts, ouvrant la voie à une calibration plus précise dans les dernières étapes du projet.

III.5 Développement de l'interface avec Django :

Pour rendre les résultats des mesures accessibles sans écran dédié, nous avons créé un serveur web interactive basée sur le framework **Django**, installée et fonctionnant directement sur le Raspberry Pi. Cette interface permet à l'utilisateur de visualiser les résultats des mesures via un simple navigateur connecté au même réseau.

5.1 Création et configuration du projet :

Le développement a commencé par la création d'un environnement Python virtuel à l'aide de la commande :

```
source ./WaterQPFE/bin/activate
```

Ensuite, nous avons créé un nouveau projet Django :

```
django-admin startproject hydropro01
```

```
cd hydropro01
```

```
python manage.py startapp main
```

Nous avons créé une application principale nommée **main** et contient la logique de gestion des vues et des modèles. Le projet a été initialisé dans **settings.py** (ajout de l'application main, configuration des **templates** et **static**), puis le serveur a été démarré avec :

```
python manage.py runserver
```

En utilisant la commande **Hostname -I**, nous avons récupéré l'adresse IP locale du Raspberry Pi, ce qui nous permet d'accéder à l'interface depuis n'importe quel appareil connecté au même réseau (Wi-Fi ou Ethernet).

Il était nécessaire d'ajouter l'adresse IP du Raspberry Pi à la variable **ALLOWED_HOSTS** dans **settings.py** pour permettre les connexions externes.

5.2 Organisation et design de l'interface :

L'interface principale est affichée à l'adresse **http://[adresse_ip]:8000/** et contient trois liens fonctionnels :

- Mesure de ph
- Mesure de Chlore
- Mesure de Turbidité

Ces pages ont été créées dans le dossier **templates/main/** sous forme de fichiers **.html**, chacun lié à une vue spécifique dans **views.py** et acheminé via **urls.py**.

Les éléments visuels (logos, images, drapeaux, icônes) sont placés dans le dossier **static/main/**. Une attention particulière a été accordée à l'apparence :

- Fond animé avec des couleurs fluides
- Texte centralisé et police de caractère joyeuse
- Footer « Fabriqué en Algérie » centré en bas de page
- Une organisation interactive et réfléchie

La structure de notre projet Django suite l'organisation standard suivante :

```
/hydropro01/  
|  
|-- manage.py  
|-- db.sqlite3  
|  
|-- /hydropro01/ ← projet principal Django  
|   |-- settings.py  
|   |-- urls.py  
|  
|-- /main/ ← application principale  
|   |-- views.py  
|   |-- urls.py  
|  
|-- /templates/
```

```
| └── /main/
| ├── index.html ← page principale
| ├── ph.html ← mesure de ph
| ├── chlore.html ← mesure de chlore
| └── turbidite.html ← mesure de turbidité
|
|── /static/
|   ├── /main/
|   ├── style.css ← style et animation
|   └── algeria-flag.png ← Drapeau Algérien
```

5.3 Intégration du code Python de lecture :

Nous avons utilisé un script **Python** basé sur la bibliothèque **pigpio** pour lire les fréquences de couleur du capteur TCS3200. Ce script configure les broches GPIO du Raspberry Pi, sélectionne les filtres (rouge, vert, bleu et clearance), puis mesure les temps d'impulsion pour calculer la fréquence.

Les fonctions de base du script sont les suivantes

- **set_sensor_frequency()** : pour régler la fréquence de sortie du capteur.
- **sensor_read_color(couleur)** : Lit la fréquence d'une couleur spécifique.
- **set_colour() et led_config()** : Contrôlent l'éclairage RVB.

Afin de valider l'exécution du script, une figure montre l'affichage des fréquences mesurées directement dans le terminal (**print()**). Ce résultat confirme le bon fonctionnement du code et la réception des données en temps réel.

```
11 S0 = 17
12 S1 = 27
13 S2 = 22
14 S3 = 23
15
16 pi = pigpio.pi()
17 #Lighting LED
18 pi.set_mode(light_Led, pigpio.OUTPUT) # Set GPIO 26 as output for light LED
19 pi.write(light_Led, ONOFF_Light) # Turn on/ff the light LED
```

PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS

```
○ PFE2025@waterQ:~/project $ /home/PFE2025/project/waterQPFE/bin/python /home/PFE2025/project/test.py
Red: 67839, Green: 74751, Blue: 67401, clear: 62135
Red: 66818, Green: 74116, Blue: 67793, clear: 63764
Red: 64669, Green: 73178, Blue: 67040, clear: 62394
Red: 58861, Green: 75379, Blue: 70535, clear: 62877
Red: 67220, Green: 73813, Blue: 67368, clear: 63208
Red: 66521, Green: 42618, Blue: 83786, clear: 63662
Red: 62921, Green: 73297, Blue: 66943, clear: 62534
Red: 65231, Green: 73322, Blue: 67671, clear: 63058
Red: 67080, Green: 73965, Blue: 67572, clear: 62856
Red: 66847, Green: 73821, Blue: 67370, clear: 62840
Press return to stop:
```

Ln 1, Col 1 Spaces: 3 UTF-8 LF Python

Figure III-11 : affichage des fréquences dans le terminal lors de l'exécution du script

5.4 Accès distant a l'interface :

Une fois le serveur démarré, l'interface peut être visualisée à partir de plusieurs ordinateurs connectés au même réseau local, en entrant simplement l'adresse IP du Raspberry Pi suivie du port :

<http://192.168.1.103:8000>

Ceci a permis de vérifier l'accessibilité multi-utilisateurs sans avoir besoin d'un moniteur supplémentaire, et de tester l'ergonomie de l'interface à partir de différents supports.

5.5 Affichage de l'interface web depuis différents supports :

Afin de valider l'accessibilité de l'interface web développée avec Django, nous avons effectué des tests d'affichage depuis différents appareils.

L'objectif était de vérifier que l'application pouvait être consultée à partir de plusieurs supports, quels que soient les moyens de connexion utilisés (Wi-Fi ou Ethernet), tant que les appareils sont correctement configurés et connectés au réseau auquel le Raspberry Pi est relié.

Nous avons ainsi réussi à afficher l'interface :

- depuis l'ordinateur sur lequel Django est exécuté localement (via l'adresse 127.0.0.1:8000 utilisée pour les tests de développement).

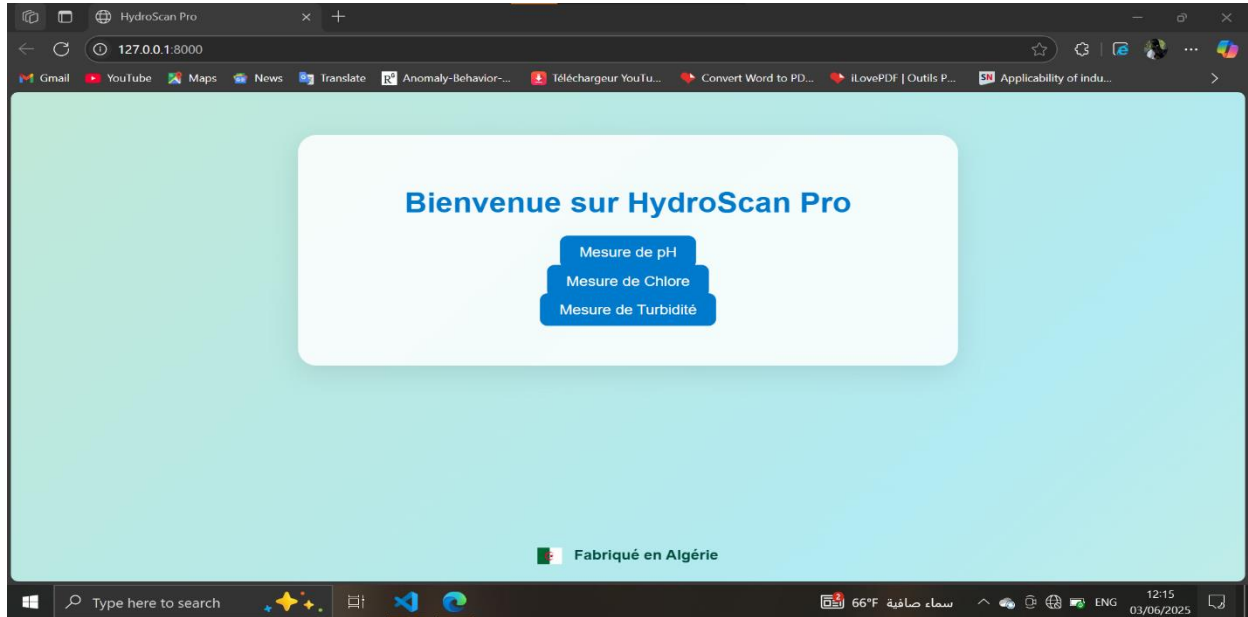


Figure III-12 : interface Django sur le pc local

- depuis un ordinateur distant via l'adresse IP locale obtenue dynamiquement (192.168.x.x:8000).

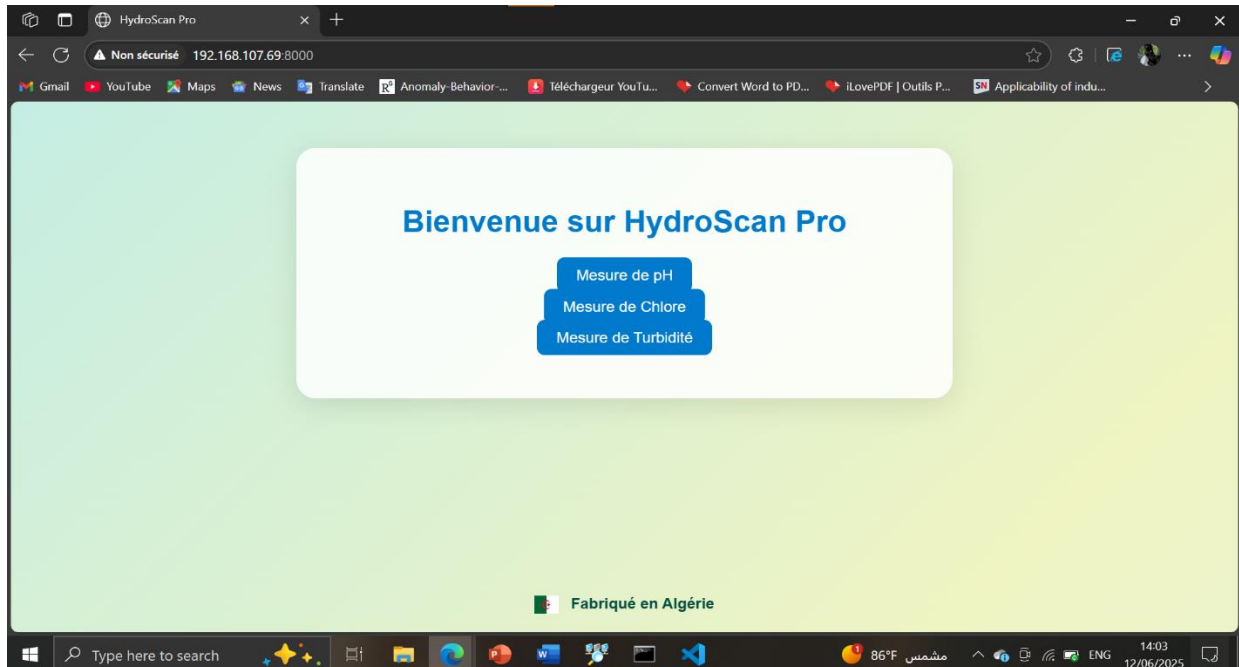


Figure III-13 : interface Django sur un appareil via une adresse IP locale

- et depuis un smartphone, en accédant à l'adresse IP via un navigateur web.

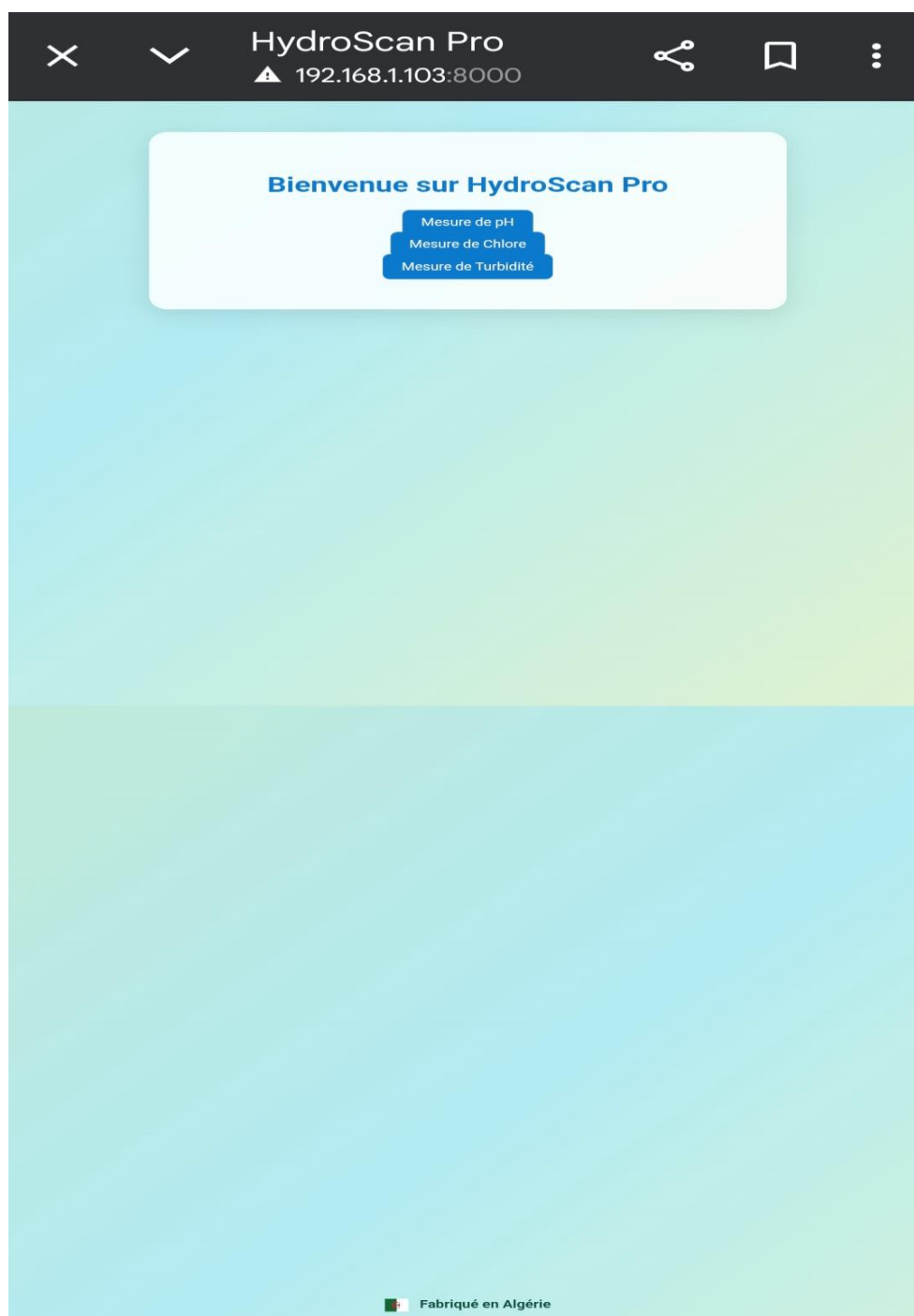


Figure III-14 : interface Django affichée sur un smartphone

Ces essais démontrent la flexibilité de notre solution, ainsi que sa compatibilité multiplateforme pour les tests, la supervision ou l'utilisation sur le terrain.

III.6 Modélisation 3D du prototype final :

Afin de garantir un positionnement optimal du capteur optique par rapport à l'échantillon d'eau, une maquette 3D du boîtier a été conçue à l'aide du logiciel Fusion 360.

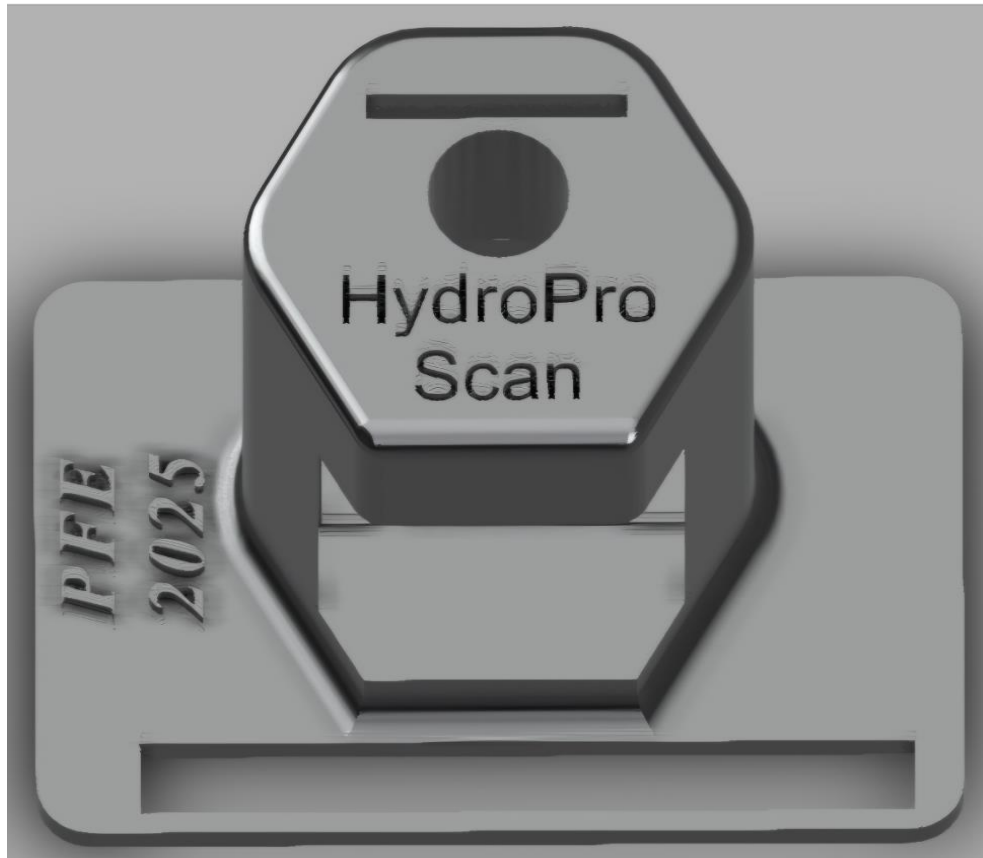


Figure III-15 : modèle 3D du boîtier réalisé sous Fusion360

Ce boîtier compact permet :

- L'insertion d'un tube d'échantillonnage par le haut.
- L'intégration frontale du capteur TCS3200 avec ses LED orientées vers le liquide.
- L'orientation de la lumière via un miroir interne pour maximiser la réflexion.
- Le passage des câbles de connexion vers le Raspberry Pi, positionné en dessous.

Le design respecte les dimensions exactes des composants et a été pensé pour une impression 3D rapide, économique et efficace.

Une visualisation interactive du modèle est accessible via le QR Code ci-dessous :

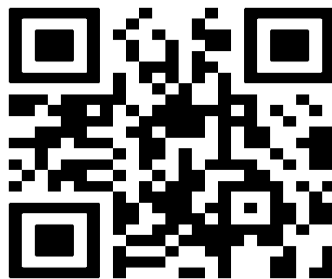


Figure III-16 : visualisation interactive du boîtier HydroPro Scan

III.7 Conclusion :

Ce chapitre a présenté la mise en œuvre concrète de notre système de mesure dédié à l'analyse de la qualité de l'eau, en intégrant à la fois les aspects matériels et logiciels dans un cadre applicatif réel.

Nous avons tout d'abord exposé l'architecture matérielle adoptée, en soulignant le rôle déterminant de certains composants tels que le capteur couleur TCS3200, la photodiode et le microcontrôleur Raspberry Pi. Ces éléments ont été sélectionnés pour leurs accessibilités, leur faible coût, ainsi que leurs adaptabilités aux contraintes techniques et environnementales du projet.

Par la suite, nous avons détaillé l'implémentation logicielle, depuis la configuration du Raspberry Pi jusqu'à l'acquisition des données et leur affichage dynamique à travers une interface web développée avec Django. Cette interface, consultable à distance via un simple navigateur, assure une interaction intuitive et efficace avec le système, sans nécessiter d'écran ni périphérique local.

Les différentes étapes de prototypage, de connexion, de test et de visualisation ont permis de valider la faisabilité technique de la solution proposée. Elles marquent une avancée significative vers un dispositif IIoT intelligent, léger, modulaire et parfaitement adapté au suivi décentralisé de la qualité de l'eau.

CHAPITRE IV :
MODELE D’AFFAIRES
HYDRO PRO SCAN



Elevator pitch

Ces dernières années, l'Algérie a connu une nouvelle dynamique entrepreneuriale, alimentée par l'émergence de startups. Grâce à un cadre juridique innovant, à des plateformes comme Startup.dz et à un soutien accru du gouvernement, des centaines de jeunes se sont lancés dans l'innovation locale, souvent en réponse à des problématiques concrètes et quotidiennes.

C'est dans ce contexte que nous avons imaginé l'HydroPro Scan : Un spectrophotomètre portable, connecté et peu coûteux conçu pour répondre à un défi majeur en Algérie : Contrôler la qualité de l'eau de manière simple et accessible.

Animés par la volonté de transformer les usages traditionnels par la technologie, nous avons développé un appareil intelligent qui s'adapte aux réalités du terrain, capable de mesurer le ph, la turbidité et le chlore libre, sans nécessiter d'infrastructure lourde ou d'expertise technique.

1. Proposition de valeur : (quelle valeur unique apporte mon projet aux utilisateurs cibles ? pourquoi vont-ils l'acheter ou l'utiliser)

Le spectrophotomètre connecté apporte une solution économique et pratique pour mesurer la qualité de l'eau. Il répond à un besoin local en proposant un dispositif abordable, facile à utiliser et adapté aux réalités du terrain.

- **Accessibilité et prix abordable**

L'appareil est peu coûteux et peut être fabriqué localement. Il offre une alternative accessible aux équipements d'analyse importés, souvent chers et difficiles à obtenir.

- **Solution locale et adaptée**

Le spectrophotomètre est conçu en tenant compte des besoins et des contraintes locales (zones rurales, ressources limitées, facilité d'utilisation), ce qui le rend plus pratique que les solutions standards. Notre solution peut également s'intégrer dans le cadre de projets de villes intelligentes visant à améliorer la gestion de la qualité de l'eau à l'échelle urbaine.

- **Autonomie et contrôle en temps réel**

Les utilisateurs peuvent mesurer la qualité de l'eau à tout moment via une application mobile, sans dépendre de laboratoires ou d'experts, ce qui facilite la surveillance continue.

- **Introduction des technologies modernes dans les activités traditionnelles**

Ce projet permet aux jeunes, notamment en milieu rural, de découvrir et utiliser des outils modernes comme les capteurs, l'intelligence artificielle et les applications mobiles dans des activités comme l'agriculture ou l'environnement.

2. Segments de clientèle

- laboratoires d'analyse de l'eau qui recherche des solutions innovantes, rentables et connectées pour des mesures rapides sur site.
- Station d'épuration : Les stations d'épuration des eaux usées doivent constamment contrôler la qualité de l'eau avant et après le traitement. Notre spectrophotomètre connecté leur fournit un outil pratique pour garantir le respect des normes environnementales.
- Agricultures traditionnelles : L'eau d'irrigation est un facteur critique pour la productivité agricole. Ce dispositif leur offre un moyen économique et fiable de contrôler la qualité de l'eau utilisée dans leurs exploitations, contribuant ainsi à une agriculture durable et à la protection des sols.
- Gestionnaires de piscines publiques ou privées : Les piscines, qu'elles soient publiques, d'hôtels, de centres sportifs ou même résidentielles, nécessitent un suivi régulier et rigoureux de la qualité de l'eau afin d'assurer la sécurité sanitaire des baigneurs. En effet, une eau mal entretenue peut être source d'infections, d'irritations cutanées ou oculaires, et de non-conformité aux normes de santé publique.
- Etablissement éducatif et de recherche : Les universités, les instituts de recherche et les laboratoires universitaires peuvent utiliser l'équipement pour des travaux pratiques, des projets de fin de cursus ou des études relatives à la qualité de l'eau.
- ONG et associations environnementales : Notre solution peut être intégrée par ces institutions dans leurs programmes de sensibilisation ou de surveillance écologique, en particulier dans les zones éloignées ou mal surveillées.
- Municipalités rurales ou communes sans laboratoires : Dans de nombreuses zones rurales ou communes éloignées en Algérie, l'accès à des laboratoires d'analyse de la qualité de l'eau est limité, voire inexistant. Ces localités sont pourtant confrontées à des enjeux majeurs liés à l'eau : pollution des nappes phréatiques, présence de métaux lourds, dégradation de la qualité des puits, ou encore risques sanitaires dus à une mauvaise gestion des réseaux d'assainissement.

3. Relations clients :

Pour garantir une expérience utilisateur optimale et établir une relation de confiance à long terme, diverses formes de relations avec les clients seront établies autour du spectrophotomètre connecté. Ces relations visent à soutenir les utilisateurs à chaque étape, de la configuration initiale à l'utilisation régulière et aux futures mises à jour de l'appareil.

- **Application mobile personnalisée**

L'application mobile est un outil central dans l'interaction entre l'utilisateur et le spectrophotomètre connecté. Conçue pour être intuitive, conviviale et accessible via un smartphone ou une tablette, elle joue un rôle clé dans le suivi, la gestion et l'interprétation des données de mesure.

Grâce à cette application, l'utilisateur peut :

- Visualiser les mesures en temps réel (ph, turbidité, couleur) sous forme de graphiques interactifs ou de tableaux structurés.

- Recevoir des alertes intelligentes en cas de dépassement d'un seuil critique (par exemple, ph très acide ou basique, turbidité excessive).
- Accéder à un historique détaillé de toutes les mesures pour effectuer des analyses comparatives dans le temps.
- Exporter les données au format Excel ou PDF pour les rapports techniques, les travaux de recherche ou la documentation universitaire.
- Configurer et calibrer l'appareil à distance grâce à une interface guidée et conviviale.
- Sélectionner la langue d'affichage (français, arabe, anglais...) pour garantir l'accessibilité à un large éventail d'utilisateurs.
- Contacter directement l'assistance technique par le biais d'un système de messagerie intégré ou d'un lien d'assistance direct.
- Cette application est plus qu'un simple visualiseur de données - c'est une extension numérique de l'appareil physique, qui améliore l'autonomie de l'utilisateur, la fidélisation de la clientèle et l'amélioration continue du service.

- **Assistance technique :**

L'assistance technique est un élément clé pour garantir une utilisation optimale, fiable et sûre du spectrophotomètre connecté. Il est conçu pour aider les utilisateurs tout au long du cycle de vie du produit, de la configuration initiale à l'utilisation quotidienne.

Plusieurs mécanismes d'assistance seront mis en œuvre pour fournir une aide efficace et accessible :

- Un manuel d'utilisation détaillé, fourni avec l'appareil sous forme imprimée et numérique, expliquant les procédures d'installation, d'utilisation et d'entretien.
- Des didacticiels vidéo, disponibles via l'application mobile ou le site web officiel, démontrant l'étalonnage, la mesure et l'interprétation des données.
- Un système d'assistance en ligne par messagerie instantanée ou formulaire de contact, permettant aux utilisateurs de poser des questions techniques ou de signaler des problèmes.
- Un service de maintenance, disponible en cas de dysfonctionnement de l'appareil, de défauts matériels ou de besoins de réétalonnage.
- Des mises à jour logicielles à distance, garantissant que le système reste à jour, sécurisé et performant sans nécessiter d'intervention physique.
- Ce système d'assistance vise à :
 - Améliorer la satisfaction et la fidélité des clients,
 - Réduire les erreurs d'utilisation,
 - Prolonger la durée de vie fonctionnelle du produit dans divers environnements d'utilisation (éducatif, public ou industriel).

• Événements de formation

En plus du soutien technique, des formations seront organisées pour faciliter l'adoption par les utilisateurs du spectrophotomètre connecté. Ces sessions seront adaptées à différents publics et proposées sous différentes formes :

- Ateliers pratiques organisés au sein d'établissements éducatifs ou de municipalités, offrant une prise en main concrète de l'appareil dans des conditions réelles.
- Webinaires interactifs présentant les principales caractéristiques des produits et avec des sessions de questions-réponses en direct.
- Des sessions de formation personnalisées, dispensées sur site ou à distance, conçues pour les partenaires institutionnels et industriels.
- Programmes de certification des utilisateurs qui permettent aux participants de démontrer et de valider leur compétence dans l'utilisation du spectrophotomètre.
- Effectuer des essais et échantillons gratuits, démonstration des d'unités portables connecté auprès des services communaux et exploitations agricoles pour prouver la facilité d'utilisation et l'accès à distance.

Ces initiatives visent à renforcer la confiance des utilisateurs, à valoriser l'usage pédagogique du dispositif et à fédérer une communauté active et engagée autour de la solution.

4. Canaux de distribution

Les canaux de distribution représentent l'ensemble des moyens permettant de mettre le produit à disposition des utilisateurs finaux. Ils assurent non seulement la livraison du dispositif, mais aussi l'accès aux services associés et la communication avec les différents segments de clientèle.

Dans le cadre de notre projet, plusieurs canaux ont été identifiés afin de répondre efficacement aux besoins spécifiques de chaque type de client :

- **Vente en ligne** : constitue un canal de distribution stratégique pour notre produit. Elle permet d'élargir l'accès au spectrophotomètre connecté au-delà des circuits traditionnels, en atteignant un public plus vaste à un coût réduit. Le dispositif pourra être proposé sur des plateformes de e-commerce locales telles que **Jumia**, **OuedKniss**, ou d'autres marketplaces régionales. À plus long terme, un **site web dédié** pourra être développé afin d'assurer la vente directe, de fournir des mises à jour logicielles, un support technique, ainsi qu'une base de données consultable.
- **Vent directe** : représentent un canal de distribution clé pour atteindre les utilisateurs locaux, en particulier ceux qui préfèrent voir et tester le produit avant de l'acheter. Le spectrophotomètre connecté peut être distribué par l'intermédiaire de points de vente physiques, tels que des magasins spécialisés en électronique, en matériel agricole ou en équipements environnementaux.

Cette approche permet une interaction humaine directe, des démonstrations sur place et contribue à renforcer la confiance dans le produit. Elle est particulièrement pertinente dans les régions où l'accès à l'internet est limité ou peu fiable, ce qui rend les ventes en ligne moins pratiques.

- **Partenariats éducatifs ou publics** : Le projet peut s'appuyer sur des partenariats stratégiques avec des établissements d'enseignement tels que des universités, des lycées techniques et des centres de formation professionnelle. Ces collaborations permettraient d'intégrer le spectrophotomètre connecté dans les programmes d'enseignement, les activités de laboratoire, en particulier, dans les projets de fin d'études des étudiants spécialisés en électronique, en sciences de l'environnement ou en génie industriel.

Par ailleurs, des partenariats avec des institutions publiques locales (mairies, agences environnementales, centres de recherche publics) pourraient favoriser une diffusion encadrée et ciblée du dispositif, notamment dans le cadre d'initiatives liées à l'éducation environnementale, à la sensibilisation citoyenne, ou à la surveillance locale de la qualité de l'eau.

- **Réseaux sociaux et marketing numérique** : Les plateformes de médias sociaux offrent un canal de communication essentiel pour accroître la visibilité et la portée du spectrophotomètre connecté, en particulier parmi les étudiants, les éducateurs et les communautés axées sur la technologie. Les plateformes telles que Facebook, Instagram, LinkedIn et YouTube seront exploitées pour :
 - Présenter l'appareil par le biais de vidéos tutoriels et de démonstrations pratiques,
 - Partager les commentaires des utilisateurs et les études de cas,
 - Communiquer les mises à jour du logiciel, les nouvelles et les applications sur le terrain.

En parallèle, une stratégie de marketing numérique incluant du référencement web (SEO), des publicités sponsorisées, et une présence active sur les forums spécialisés permettra de toucher un public plus large, localement et à l'international.

5. Partenariats clés

La mise en œuvre et le déploiement du spectrophotomètre connecté reposent sur des partenariats stratégiques qui permettent de faciliter l'accès au marché, réduisent les coûts de fabrication et renforcent l'impact global du projet :

- **Collectivités locales et mairies**

Ces institutions peuvent jouer un rôle dans la mise à disposition d'espaces de test, la sensibilisation du public à la qualité de l'eau et intégrer l'appareil dans les initiatives environnementales locales.

- **Magasins spécialisés dans l'électricité et l'électronique**

Ces points de vente au détail représentent un canal de distribution clé pour atteindre les utilisateurs finaux (techniciens, agriculteurs, étudiants) et assurer la disponibilité locale du produit.

- **Associations environnementales**

Elles peuvent faciliter l'adoption de l'appareil sur le terrain, soutenir des campagnes de sensibilisation à l'écologie et contribuer à des projets éducatifs et de conservation de l'eau.

- **Petites cultures et exploitations agricoles**

Ces partenaires bénéficient directement de la capacité de l'appareil à contrôler la qualité de l'eau d'irrigation et peuvent fournir des informations précieuses pour améliorer le produit.

- **Universités, écoles et lycées**

Ces établissements d'enseignement servent de plateformes d'expérimentation, de formation, et de diffusion du dispositif à travers des projets pédagogiques, des travaux pratiques et de programmes d'enseignement.

- **Fournisseurs de services cloud et entreprises de télécommunications :**

Nous souhaitons collaborer avec des Organismes gouvernementaux tel que les subdivisions d'hydraulique communales et les entreprises de distributions d'eau potable. Collaborer avec des entreprises d'hébergements et des services clouds et des télécommunications, pour optimiser le stockage des données et les capacités de surveillance à distance.

6. Activités clés

Dans le cadre du modèle commercial du spectrophotomètre connecté, plusieurs activités clés sont essentielles pour assurer la création de valeur, la viabilité technique du produit et son adéquation avec les besoins du marché :

- **Conception et fabrication du dispositif**

Il s'agit de sélectionner les composants électroniques (Raspberry Pi, capteurs, Sources lumineuses à base de LED, ADC, etc.), d'assembler physiquement le système et de produire le boîtier à l'aide de l'impression 3D. Ceci constitue la base matérielle du produit.

- **Développement d'applications embarquées et mobiles**

Le développement de logiciels est essentiel pour permettre l'interaction de l'utilisateur avec l'appareil. Cela inclut l'interface mobile, d'assurer la communication entre les capteurs et le microcontrôleur, ainsi que le traitement des données via des algorithmes embarqués ou en ligne.

- **Calibration et validation des capteurs**

Afin de garantir des mesures fiables, une phase calibration est indispensable, à l'aide de solutions de référence. Elle permet d'assurer la précision des mesures de pH, de turbidité et de couleur.

- **Adaptation aux besoins agricoles et environnementaux**

L'appareil est conçu pour répondre aux besoins spécifiques de l'agriculture locale, des ONG environnementales et des établissements d'enseignement. L'adaptation technique et fonctionnelle aux conditions de terrain est donc une activité essentielle.

- **Support et sensibilisation**

Des sessions de formation, d'assistance technique et des activités de sensibilisation scientifique seront organisés pour guider les utilisateurs, renforcer leur autonomie et promouvoir la diffusion du dispositif dans des contextes variés.

7. Ressources clés

La réussite économique du projet dépend de l'identification et du déploiement de ressources clés pour créer de la valeur, optimiser les coûts de développement et assurer la viabilité à long terme du spectrophotomètre connecté :

- **Compétences techniques et scientifiques :**

Les expertises en électronique, en programmation Python, en développement d'interfaces mobiles, en intelligence artificielle et en traitement du signal sont à la base de la conception du produit. Elles permettent de limiter la sous-traitance et donc de réduire les coûts de développement.

- **Prototypes existants :**

Les prototypes existants du spectrophotomètre connecté représentent une ressource stratégique, fournissant une base solide pour accélérer l'industrialisation. Cela réduit le temps de mise sur le marché et diminue les risques techniques et financiers liés à la phase de conception.

- **Politique locale prometteuse :**

Le contexte actuel, marqué par un intérêt croissant pour la qualité de l'eau et l'innovation environnementale, crée des opportunités de financement public, de partenariats institutionnels et d'intégration dans des programmes éducatifs ou communautaires. Cette dynamique constitue un environnement favorable au déploiement et à la promotion des spectrophotomètres connectés au niveau local.

8. Structures de coûts

- **coûts de matériel**

Le coût estimé de la construction du spectrophotomètre connecté est basé sur l'assemblage de composants électroniques standard et abordables. Vous trouverez ci-dessous une ventilation des principaux composants utilisés dans le prototype :

- Carte mère avec firmware: 14 000 DZD
- Capteur de couleur TCS3200 : 1 500 DZD
- PHotodiode : 200 DZD
- Convertisseur ADC (ADC0832) : 700 DZD
- Amplificateur opérationnel (TL081) : 300 DZD
- Composants divers (câbles, résistances, planche à pain, connecteurs, etc :) 1 000 DZD
- Boîtier imprimé en 3D : 1 000 DZD
- Composants optionnels (LED, interrupteurs, etc.) : 300 DZD

Coût total estimé : environ 19 000 DZD

Il s'agit d'un budget très raisonnable pour un dispositif technologique complet et fonctionnel. De plus, ce coût pourrait être encore optimisé pour une production à grande échelle, grâce à des achats en gros ou à des partenariats avec des fournisseurs locaux.

• Développement logiciel

Le développement logiciel du spectrophotomètre connecté comporte trois volets principaux : la création d'une application mobile, l'interfaçage avec le matériel et l'intégration d'un modèle d'intelligence artificielle pour le traitement des données. L'Access mobile est possible directement avec une interface web existante d'origine. La programmation embarquée en Python - pour gérer les capteurs et assurer la communication avec l'application - implique un coût en temps, mais pas de coût financier direct lorsqu'elle est réalisée en interne. Tous les outils logiciels nécessaires (bibliothèques Python, modules d'intelligence artificielle, outils de visualisation de données) sont libres et gratuits. L'hébergement optionnel dans le nuage ou dans une base de données peut coûter entre 10 000 et 30 000 DZD par an. La formation, la documentation et les tests du logiciel dépendent du temps et des ressources d'apprentissage nécessaires. Globalement, le coût total reste faible à modéré, grâce à l'utilisation de technologies gratuites et à l'implication directe du développeur.

• Services et infrastructure :

Pour assurer un fonctionnement optimal du spectrophotomètre connecté, certains services numériques ou techniques peuvent s'avérer nécessaires. Bien que leurs coûts restent modestes, ils doivent être pris en compte dans une stratégie de déploiement à long terme. Parmi ces services figurent :

- L'abonnement à une plateforme cloud ou à une base de données en ligne : pour le stockage, les analyser ou les partager à distance, coût estimé entre 10 000 et 30 000 DZD par an, selon le fournisseur.
- L'hébergement d'un site web ou d'un espace de visualisation des données (nom de domaine + hébergement de base) : entre 800 et 1 500 DA par an.
- L'utilisation d'outils d'analyse IA ou d'APIs externes (optionnel) : ces services peuvent impliquer des frais supplémentaires, selon les solutions choisies.
- Impression de documentation technique ou rapports d'analyse : 500 à 800 DA
- La mise en place d'un système de messagerie d'assistance ou de gestion de tickets clients : optionnel, selon l'échelle du projet.

Coût estimé global : entre 20 000 et 50 000 DZD par an selon les outils choisis et les options activées. Ces services assurent la connectivité, la pérennité et l'évolutivité du système, notamment si le projet prend de l'ampleur à moyen ou long terme.

• Communication et marketing

Pour assurer la visibilité du spectrophotomètre connecté et sensibiliser les utilisateurs cibles, une partie du budget est allouée à la communication stratégique et aux activités promotionnelles. Ces dépenses

sont principalement des investissements initiaux réalisés pendant la phase de lancement du produit, et ne sont pas récurrentes avec chaque unité produite. Elles comprennent :

- La conception et la production de contenus promotionnels (affiches, brochures, vidéos de démonstration) : 1 000 à 2 000 DZD
- Publicité sur les médias sociaux (publicités sponsorisés, publications ciblées) : 3 000 à 5 000 DZD
- Participation à des événements scientifiques ou éducatifs : variable selon les frais d'inscription ou de déplacement
- Développement d'un site web ou d'une page de présentation : 1 000 à 2 000 DA (y compris l'hébergement et l'achat éventuel d'un domaine).

Coût estimé total : entre 5 000 et 9 000 DA, à engager principalement lors de la phase de lancement du produit.

Ces efforts sont essentiels pour maximiser l'impact du projet, instaurer une confiance initiale et atteindre des publics clés tels que les éducateurs, les agriculteurs, les étudiants et les ONG environnementales.

- **Main d'œuvre et encadrement**

Bien que le projet soit réalisé dans un cadre académique, il nécessite un investissement humain important, notamment en termes de temps et d'expertise. Les principaux aspects liés à la main d'œuvre sont les suivants :

- Le temps passé à concevoir, développer et tester le dispositif.
- Le soutien pédagogique, y compris les contributions des enseignants, des techniciens et des mentors externes.
- L'aide à la documentation, au prototypage et à l'analyse des données.

Bien que ces efforts ne se traduisent pas toujours par des dépenses monétaires directes, ils représentent une réelle valeur ajoutée. Dans le cas de l'externalisation, ils peuvent s'élever à plusieurs dizaines de milliers de Dinars

- **Maintenance et support**

Pour assurer le fonctionnement à long terme du spectrophotomètre connecté, certains frais d'entretien sont nécessaires :

- Remplacement des composants défectueux (capteurs, câbles, etc.) : environ 500 à 1 500 Da par an, en fonction de l'utilisation.
- Recalibrage périodique des capteurs : nécessaire selon les besoins et pouvant être effectué en laboratoire.
- Mises à jour de l'application mobile ou du code intégré : nécessite une implication technique permanente.
- Assistance aux utilisateurs (si le produit est commercialisé) : facultative, en fonction de l'ampleur du projet.

- Coût total estimé : faible à modéré, surtout si la maintenance est assurée par l'utilisateur ou un partenaire technique local.

- **Prix de vente estimé**

En tenant compte du coût de production 19 000 DZD, des coûts indirects, de la marge pour assurer la viabilité économique, ainsi que de l'impact éducatif et écologique, un prix de vente d'environ 25 000 à 30 000 DZD par unité a été établi. Ce prix reste compétitif pour les établissements éducatifs, les ONG ou les utilisateurs techniques, tout en permettant une marge raisonnable pour le financement de la maintenance ou de futures améliorations.

9. Sources de revenus

Le modèle économique du spectrophotomètre connecté s'appuie sur diverses sources de revenus complémentaires, destinées à garantir non seulement la pérennité financière du projet, mais aussi son aptitude à répondre aux besoins de divers segments de clientèle. Ces revenus proviennent de la vente du dispositif, des services numériques liés, ainsi que de la valorisation des données générées par l'utilisation de l'appareil.

- **Vente directe du dispositif :**

Les ventes directes représentent la principale source de revenus du projet. Le spectrophotomètre connecté sera commercialisé sous la forme d'un appareil entièrement intégré et prêt à l'emploi, comprenant :

- Un boîtier équipé d'un Raspberry Pi et de capteurs intégrés,
- Un kit d'alimentation et de câblage,
- Un manuel de l'utilisateur (en format papier et numérique),
- Un accès à l'application mobile de base.

L'appareil sera proposé en plusieurs versions adaptées aux besoins des différents segments de clientèle:

- Version éducative : offerte à un prix réduit, destinée aux lycées techniques, universités et centres de formation.
- Version standard : destinée aux utilisateurs publics tels que les municipalités, les ONG ou les gestionnaires de piscines.
- Version professionnelle : dotée de fonctionnalités étendues et d'un étalonnage avancé, elle est destinée aux clients industriels et aux bureaux d'études.
- La commercialisation sera assurée à travers
- Des magasins de détail spécialisés (électronique, agriculture, équipement environnemental),
- Des salons technologiques et événements académiques,
- Des commandes institutionnelles directes de la part d'organisations publiques ou privées intéressées.

Cette stratégie assure un flux de revenus immédiat et tangible, tout en ouvrant la porte à des offres de services complémentaires telles que les abonnements aux logiciels, l'assistance technique et les forfaits de maintenance.

- **Vente en ligne et abonnements**

Les ventes en ligne, par l'intermédiaire d'un site web dédié et de plateformes de commerce électronique, constituent une source de revenus complémentaire en touchant un public plus large.

Un modèle d'abonnement pour l'application mobile offrira des services avancés (stockage dans le nuage, rapports, alertes), avec des plans mensuels ou annuels adaptés aux différents profils d'utilisateurs.

Cette approche garantit des revenus récurrents et soutient le développement continu de la solution.

- **Exploitation des données générées**

Il est possible de monétiser les données environnementales collectées (anonymisées) via divers moyens :

Vente de données agrégées à des organismes publics ou privés (municipalités, agences, chercheurs),

Services de suivi et de représentation visuelle (tableaux de bord, rapports réguliers),

Collaboration à des projets environnementaux avec des institutions locales ou internationales.

- **Modèles d'intelligence artificielle (IA)**

L'intégration de l'intelligence artificielle dans le système permettra des fonctions avancées telles que l'interprétation automatique des résultats de mesure, la détection des anomalies et l'analyse prédictive des tendances en matière de qualité de l'eau.

Ces fonctionnalités seront proposées dans le cadre de plans d'abonnement avancés ou vendues séparément en tant que modules complémentaires pour les utilisateurs professionnels et institutionnels à la recherche d'une meilleure intelligence des données et d'une aide à la décision.

- **Formations et certifications**

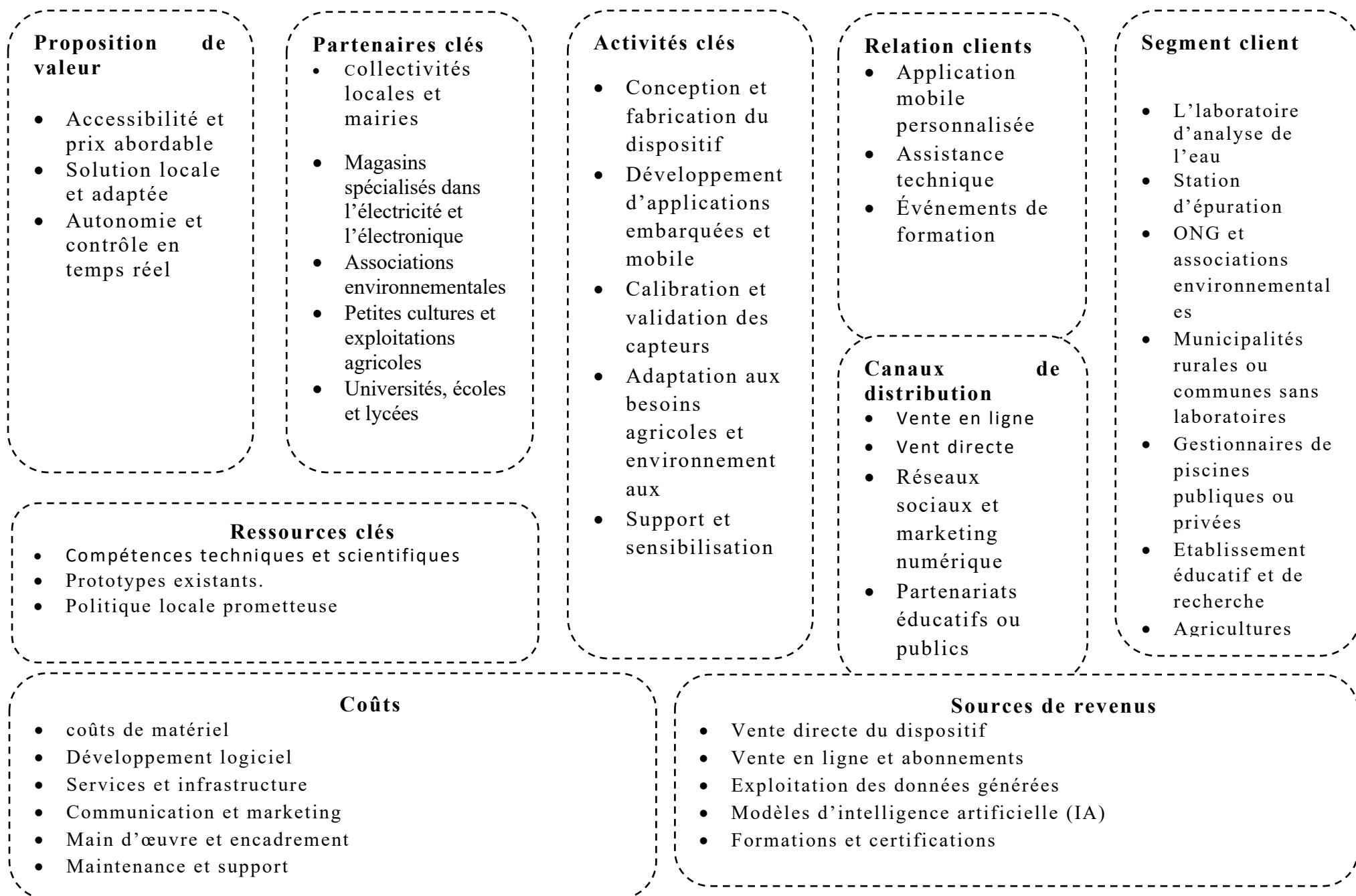
Des programmes de formation certifiés seront proposés à une variété d'utilisateurs (étudiants, techniciens, autorités locales) afin de garantir une utilisation optimale du spectrophotomètre et une interprétation précise des données.

Ces formations seront dispensées en présentiel (au sein d'établissements d'enseignement ou d'organismes publics) ou à distance (via des webinaires, des vidéos tutorielles ou des plateformes MOOC).

Elles constitueront une source de revenus complémentaire tout en apportant une valeur éducative et professionnelle aux participants, notamment par la délivrance de certifications reconnues.

Pour suivre la performance et l'impact du projet, plusieurs KPI indicateurs clés seront utilisés :

- Demande croissante d'appareils portables et compatibles IIoT.
- Financement public des infrastructures de gestion de l'eau optimisé pour minimiser le gaspillage.
- Passage de la surveillance en laboratoire à la surveillance en temps réel directement dans les sites.



Conclusion :

Dans un contexte marqué par des préoccupations croissantes relatives à la gestion durable de l'eau, notre projet s'est inscrit dans une démarche innovante visant à offrir une solution locale et accessible de suivi de la qualité de l'eau, grâce aux avancées des technologies IIoT et de la spectrophotométrie.

Au fil des chapitres, nous avons établi une base scientifique solide, en présentant les principes fondamentaux de la spectrophotométrie ainsi que l'apport de l'Internet Industriel des Objets dans le domaine environnemental. Ces concepts ont permis de cadrer techniquement le développement d'un spectrophotomètre connecté, capable de mesurer les paramètres cruciaux tels que le pH, la turbidité et le chlore libre, en exploitant les données colorimétriques fournies par un capteur TCS3200, interprétées à l'aide d'algorithmes embarqués.

Sur le plan pratique, nous avons conçu un prototype complet, associant un Raspberry Pi, un logiciel de lecture basé sur Python, et une interface web intuitive développée avec Django. Ce système permet une acquisition en temps réel, un accès distant aux données, et une interaction simplifiée avec l'utilisateur, sans nécessiter d'équipements coûteux ni de compétences techniques avancées.

La dernière partie de notre travail s'est focalisée sur l'étude de viabilité commerciale du projet, en identifiant des segments de marché potentiels, des propositions de valeur claires, et des stratégies de distribution et de monétisation adaptées au contexte local algérien. Grâce à un coût de production maîtrisé, une orientation vers l'éducation, l'agriculture et la surveillance environnementale, ainsi qu'une capacité de personnalisation, notre solution peut trouver sa place dans de nombreux usages.

Ainsi, cette mémoire a permis de démontrer :

La faisabilité technique d'un système IIoT pour la qualité de l'eau.

La pertinence socio-économique de son application dans des environnements réels, ruraux comme urbains.

Le potentiel évolutif du dispositif vers des versions plus avancées intégrant des modèles d'intelligence artificielle, des services cloud, ou encore des extensions mobiles.

En conclusion, HydroPro Scan constitue une première pierre dans la construction de solutions technologiques locales, innovantes et à impact, capables de répondre à des enjeux critiques tels que la sécurité hydrique, la durabilité environnementale et l'appropriation technologique par les jeunes générations.

Bibliographie

- [1] Z. Marczenko and M. Balcerzak, “Principles of Spectrophotometry,” in *Analytical Spectroscopy Library*, vol. 10, Elsevier, 2000, pp. 26–38. doi: 10.1016/S0926-4345(00)80066-8.
- [2] V. Kumar and K. D. Gill, “PHotometry: Colorimeter and Spectrophotometer,” in *Basic Concepts in Clinical Biochemistry: A Practical Guide*, Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 17–20. doi: 10.1007/978-981-10-8186-6_5.
- [3] B. Pégourié, “Etude photométrique et spectrophotométrique de la nature et de la distribution des poussières autour des étoiles géantes et supergéantes rouges oxygénées,” 1985.
- [4] “Éléments fondamentaux de la spectrophotométrie UV-Vis.” [Online]. Available: <https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397fr-fragilent.pdf>
- [5] B. Chander and G. Kumaravelan, “Internet of Things: Foundation,” in *Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm*, S.-L. Peng, S. Pal, and L. Huang, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 3–33. Doi: 10.1007/978-3-030-33596-0_1.
- [6] M. S. Ali, M. Vecchio, M. Pincheira, K. Dolui, F. Antonelli, and M. H. Rehmani, “Applications of Blockchains in the Internet of Things: A Comprehensive Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.* vol. 21, no. 2, pp. 1676–1717, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2886932.
- [7] “(PDF) Contention & Energy-aware Real-time Task Mapping on NoC based Heterogeneous MPSoCs,” *ResearchGate*, Dec. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882941.
- [8] H. Jaidka, N. Sharma, and R. Singh, “Evolution of IoT to IIoT: Applications & Challenges,” May 18, 2020, *Social Science Research Network*, Rochester, NY: 3603739. doi: 10.2139/ssrn.3603739.
- [9] A. A. Mirani, G. Velasco-Hernandez, A. Awasthi, and J. Walsh, “Key Challenges and Emerging Technologies in Industrial IoT Architectures: A Review,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22155836.
- [10] “Fig. 4: Major Applications of IIoT in Industry 4.0 framework.” *ResearchGate*. Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Major-Applications-of-IIoT-in-Industry-40-framework_fig3_350673966

- [11] H. Mrabet, S. Belguith, A. Alhomoud, and A. Jemai, “A Survey of IoT Security Based on a Layered Architecture of Sensing and Data Analysis,” *Sensors*, vol. 20, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20133625.
- [12] “Five-layer architecture of IoT,” ResearchGate. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Five-layer-architecture-of-IoT_fig2_364333212
- [13] N. Gavrilović and A. Mishra, “Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 12, no. 1, pp. 1315–1336, Jan. 2021, doi: 10.1007/s12652-020-02197-3.
- [14] R. Bogdan, C. Paliuc, M. Crisan-Vida, S. Nimara, and D. Barmayoun, “Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas,” *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 3919, Apr. 2023, doi: 10.3390/s23083919.
- [15] R. Singh et al., “Water Quality Monitoring and Management of Building Water Tank Using Industrial Internet of Things,” *Sustainability*, vol. 13, no. 15, p. 8452, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13158452.
- [16] T. A. Mulyanto, M. Habiby, K. Kusnadi, et R. Adam, « HOME AUTOMATION SYSTEM DENGAN MENGGUNAKAN RASPBERRY PI 4 », *JD*, vol. 11, n° 1, p. 60, mai 2021, doi: .
- [17] « Carte Raspberry Pi 4 B - 4 GB - Gotronic ». Consulté le: 4 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gotronic.fr/art-carte-raspberry-pi-4-b-4-gb-30209.htm>
- [18] « Comment utiliser TCS230 Capteur de Couleur avec Arduino - Moussasoft ». Consulté le: 4 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.moussasoft.com/tcs230-capteur-de-couleur-avec-arduino/>
- [19] B. Alshehri, “Conception, fabrication et caractérisation de photodiodes à base de nitrures semiconducteurs : application aux composants ultra-rapides,” 2016. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2016VALE0022/document>
- [20] A. Jankowski, “Circuits intégrés photoniques sur InP pour la génération de signaux de puissance dans la gamme des ondes millimétriques,” 2019. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2019GREAT126/document>
- [21] T. S. M. Arshad et al., “Comparison on IV characteristics analysis between Silicon and InGaAs PIN photodiode,” in 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology and Biomedical Engineering (ICICI-BME), Bandung, Indonesia: IEEE, Nov. 2013, pp. 70–75. doi: 10.1109/ICICI-BME.2013.6698467.

Bibliographie

- [22] A. Wilson, 2023. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2023ISAL0014/document>
- [23] M. Moszynski et al., “A Comparative Study of Silicon Drift Detectors With PHotomultipliers, Avalanche PHotodiodes and PIN PHotodiodes in Gamma Spectrometry With LaBr₃ Crystals,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 56, no. 3, pp. 1006–1011, Jun. 2009, doi: 10.1109/TNS.2008.2005110.
- [24] « TCS3200 TCS230 Capteur de couleur », MicroPlanet Maroc. Consulté le: 4 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.microplanet.ma/produit/capteur-de-couleur-tcs230-tcs3200/>