

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF – M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT ÉLECTRONIQUE



DOMAINE SCIENCE ET
TECHNOLOGIE
FILIÈRE ÉLECTRONIQUE
OPTION INSTRUMENTATION

N°

MÉMOIRE PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MASTER ACADÉMIQUE

Par

DJEDDI Safinez

BADA Aya

BENDAOU D Chaima

INTITULÉ

Détection de fuite dans les réseaux de
distribution d'eau par application de nouvelles
techniques

Soutenu devant le jury composé de

Pr GUERMAT Noubel	Université de M'sila	Président
MCA.BAKHTI Haddi	Université de M'sila	Encadreur
MCA.BENTOUMI Miloud	Université de M'sila	Co- Encadreur
MCA KAHLOUCHE Ahmed	Université de M'sila	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2024 – 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

À la fin de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

Je remercie tout d'abord M. Bekhti El Hadi et M. Bentoumi Miloud pour leur encadrement, leurs conseils précieux, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long de ce projet. Leurs orientations ont eu un impact déterminant sur la réussite de ce travail.

J'exprime également ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de génie électronique de l'Université de M'sila pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de mon parcours, ainsi que pour leur soutien et leurs encouragements constants.

Je n'oublie pas de remercier mes camarades de promotion pour leur esprit de collaboration, leur aide et les moments partagés durant notre parcours universitaire.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille pour leur soutien moral et matériel inconditionnel, leurs encouragements constants et leur confiance indéfectible, qui ont été pour moi une source de motivation essentielle.

Merci 



Dédicace

À ceux qui m'ont offert la vie, illuminé mon chemin et soutenu par leurs prières sincères

À ceux dont les mots ne sauraient exprimer pleinement le mérite, et dont aucune lettre ne pourrait rendre justice

À ma mère, source de tendresse, secret de patience, et parfum de prières dans les nuits sombres.

À mon père, mon pilier dans la vie, source de force et de détermination, gardien de mes pas vers l'avenir.

À mes frères et sœurs, compagnons de route, source de joie et de soutien constant.

À ceux que j'aime sincèrement, qui ont été à mes côtés dans les difficultés et les moments d'effort et de réussite.

Et à mes chers professeurs, qui n'ont jamais ménagé leur savoir ni leurs conseils, et qui ont été les lumières éclairant mon chemin vers la connaissance.

Djeddi Safinez



Dédicace

Le chemin n'a pas été court, et il ne devait pas l'être. Le rêve n'était pas proche, et la route était semée d'obstacles. Mais je l'ai fait... et me voilà, fièrement arrivée à une étape que je chérirai toujours.

À celui que Dieu a couronné de sagesse et de dignité, à celui dont je porte le nom avec fierté, à celui dont le nom est indissociable du mien, source de soutien, de force et de générosité, mon refuge après Dieu...

Mon cher père, je te dédie ce diplôme, fruit d'années de persévérance et de sacrifice.

À la main douce et au cœur plein de lumière, à celle qui a ôté les épines de mon chemin et semé en moi l'amour du savoir, mon premier pilier, mon soutien constant, celle qui a tenu ma main avec tendresse tout au long du parcours...

Ma chère mère, tout cela est pour toi, pour ton amour inconditionnel.

À ceux que Dieu m'a bénie d'avoir dans ma vie, au lien fort et indéfectible...

Mes sœurs et mon frère, vous êtes mon refuge lorsque le monde devient trop grand, et la flamme qui éclaire mes pas.

À mon encadrant de projet, qui n'a jamais hésité à tendre la main et à offrir son accompagnement, avec tout mon respect et ma gratitude...

Monsieur Bekhti Haddi, merci pour votre suivi et votre dévouement. Vous avez été un repère essentiel dans ce parcours académique.

Et enfin...

À tous ceux qui ont semé une parole bienveillante, une prière sincère, ou un sourire au bon moment,

cet accomplissement n'est pas uniquement le mien... il est aussi à tous ceux qui ont cru en moi, ne serait-ce qu'avec un mot.

BENDAOUD chaima



Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

DÉDICACE

À moi-même,

qui ai résisté, trébuché, puis me suis relevée...

*qui ai porté le rêve malgré la fatigue, et poursuivi le chemin malgré les
difficultés,*

*cette réussite est le fruit de ta patience — sois fière de toi, comme je le suis de
toi.*

À ma chère famille,

battement de mon cœur et véritable pilier,

*merci pour vos prières, votre amour, votre patience, et chaque instant passé à
mes côtés.*

À tous ceux que j'aime sincèrement et qui m'aiment tout autant.

*Et à tous ceux qui ont contribué à ce parcours,
par un soutien, un encouragement, ou même une simple parole bienveillante...
recevez toute ma gratitude.*

BADA ALA

Résumé

Les réseaux de distribution dans le monde souffrent des problèmes de fuite. Ces dernières peuvent provoquer des endommagements des infrastructures et peuvent même altérer la santé publique par la pénétration des contaminants dans les réseaux dès qu'une chute de pression se produise. Les responsables des entreprises ADEs cherchent toujours les meilleurs moyens et dispositifs pour garder un rendement acceptable de leurs réseaux. Pour assurer une meilleure protection, les réseaux doivent être contrôlés en permanence. Plusieurs méthodes sont utilisées. En débutant par les tiges d'écoute jusqu'aux nouvelles techniques telles que celles qui utilisent les caméras infrarouge et les techniques radar. La majorité de ces techniques souffrent de l'imprécision et les fausses alarmes. Pour ce travail on a pensé à utiliser des transmetteurs de pression reflétant réellement la pression de l'écoulement à tous points de test et les nouvelles techniques qui se basent sur l'intelligence artificielles (Bi- Gru). Un réseau prototype a été réalisé à cet effet. Des mesures ont été effectuées pour créer une base de données pour l'apprentissage de l'algorithme proposé. Des tests ont été menés pour confirmer le bon fonctionnement de la méthode proposée.

Abstract

Distribution networks worldwide suffer from leakage problems. These leaks can cause damage to infrastructure and even affect public health by the penetration of contaminants into the networks as soon as a pressure drop occurs. ADEs company managers are always looking for the best ways and devices to maintain acceptable network performance. To ensure better protection, networks must be continuously monitored. Several methods are used, starting with listening rods and ending with new techniques such as those using infrared cameras and radar techniques. Most of these techniques suffer from inaccuracy and false alarms. For this work, we must consider using pressure transmitters that truly reflect the flow pressure at all test points and new techniques based on artificial intelligence (Bi-Gru). A prototype network was created for this purpose. Measurements were taken to create a database for learning the proposed algorithm. Tests were conducted to confirm the proper functioning of the proposed method.

ملخص

تعاني شبكات التوزيع في جميع أنحاء العالم من مشاكل التسرب. يمكن أن تتسبب هذه التسربات في إتلاف البنية التحتية وحتى التأثير على الصحة العامة من خلال تغلغل الملوثات في الشبكات بمجرد حدوث انخفاض في الضغط. يبحث مديرو شركة ADEs دائمًا عن أفضل الطرق والأجهزة للحفاظ على أداء مقبول للشبكة. لضمان حماية أفضل، يجب مراقبة الشبكات باستمرار. يتم استخدام العديد من الطرق، بدءًا من قضبان الاستماع وانتهاءً بالتقنيات الجديدة مثل تلك التي تستخدم كاميرات الأشعة تحت الحمراء وتقنيات الرادار. تعاني معظم هذه التقنيات من عدم الدقة والإنذارات الكاذبة. بالنسبة لهذا العمل، يجب أن نأخذ في الاعتبار استخدام أجهزة إرسال الضغط التي تعكس ضغط التدفق بشكل حقيقي في جميع نقاط الاختبار والتقنيات الجديدة القائمة على الذكاء الاصطناعي (Bi-Gru). تم إنشاء شبكة نموذجية لهذا الغرض. تم إجراء القياسات لإنشاء قاعدة بيانات لتعلم الخوارزمية المقترحة. تم إجراء الاختبارات للتأكد من الأداء السليم للطريقة المقترحة.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I.....	3
Aperçu des réseaux de distribution d'eau et des fuites	3
Introduction [1].....	4
I 1. Définition des réseaux de distribution d'eau [2].....	4
I 2. Type de réseau [2]	5
I 2.1 le réseau ramifié.....	5
I 2.2 le réseau maillé.....	6
I 2.3 Les réseaux étagés.....	6
I 2.4 Réseau mixte.....	6
I 3. Types de fuites dans les réseaux de distribution d'eau[3].....	7
I 3.1 Fuites visibles (Fuites apparentes).....	7
I 3.2 Fuites non visibles (Fuites non apparentes).....	7
I 3.3 Fuites ponctuelles.....	7
I 3.4 Fuites diffuses ou généralisée.....	8
I 3.5 Fuites dans les réservoirs (trop-plein).....	8
I 3.6 Fuites causées par des branchements illégaux ou mal exécutés.....	9
I 4. Causes des fuites d'eau dans les réseaux [1].....	9
I 4.1 Corrosion et vieillissement des matériaux.....	9
I 4.2 Suppression ou fluctuations de pression dans le réseau.....	9
I 4.3 Mouvements du sol et vibrations.....	10
I 4.4 Raccords défectueux ou mal installés.....	10
I 4.5 Absence d'entretien préventif.....	10
I 4.6 Pannes techniques ou chocs accidentels.....	10
I 4.7 Défaillance des systèmes de contrôle dans les réservoirs.....	10
I 4.8 Branchements clandestins.....	10
I 5. Les fuites d'eau en Algérie [4].....	10
I 6. Les fuites d'eau dans le monde [5].....	12
I 7. Les impacts économiques des fuites dans les réseaux de distribution d'eau.....	12
I 7.1. Perte d'eau sans revenu associé (Eau non facturée).....	13
I 7.2. Charges de maintenance en hausse.....	13

I 7.3 Consommation énergétique excessive	13
I 7.4 Coût de production de l'eau plus élevé	13
I 7.5 Déséquilibre budgétaire de l'organisme gestionnaire	13
I 7.6 Nécessité d'exploiter d'autres ressources en eau	13
I 7.7 Perte de valeur des investissements réalisés	14
I 7.8 Retard dans le développement du réseau	14
I 7.9 Réduction de la crédibilité institutionnelle	14
I 7.10 Allocation inefficace des ressources internes	14
I 8. Techniques traditionnelles de détection des fuites [6]	14
Conclusion	18
CHAPITRE II	19
Étude des performances du Raspberry Pi 5	19
Introduction	20
II.1. Qu'est-ce que Raspberry Pi 5	21
II.2. Spécifications du Raspberry Pi 5	22
II.3. Étapes de configuration initiale du Raspberry Pi 5	23
II.3.1. Les composants nécessaires	23
II.3.2. Téléchargez l'installateur	24
II.3.3. Installer le système d'exploitation	25
II.3.4. Démarrage du Raspberry Pi	29
Conclusion	36
CHAPITRE III	38
Expérimentations et mise en œuvre pratique	38
III.1 Installation du dispositif et test des transmetteurs	39
III.1.1 Montage électrique	39
III.1.2 Acquisition de données et méthodologie de mesure	40
III.1.3 Environnement logiciel	42
III.1.4 Intégration de l'intelligence artificielle	42
III.2 Obtention de données et analyse des données	43
III.2.1 Fixation des expériences	44
III.2.2 Méthode d'enregistrement	44
III.2.3 Données mesurées	44
III.2.4. Analyse des signaux de pression	45

III.2.5. Application d'un modèle BiGRU pour la détection temporelle des fuites	47
III.3. Difficultés rencontrées et solutions adoptées tout au long du projet	48
III.4 Résultats obtenue et discussion	51
III.5 Discussion générale	52
Conclusion générale	39
Liste des références	55

Liste de Figures

Chapitre I : Aperçu des réseaux de distribution d'eau et des fuites

Figure I.1 : Le réseau ramifié	5
Figure I.2.Le réseau maillé	6
Figure I .3 . Les réseaux étagés	6
Figure I.4.Fuite visible	7
Figure I. 5. Fuites ponctuelles	8
Figure I. 6. Fuites diffuses	8
Figure I. 7. Corrosion des matériaux	9
Figure I. 8 . Statistiques des fuites d'eau	11
Figure I. 9. Mesure acoustique	16
Figure I. 10. Test de pression	17

Chapitre II : Étude des performances du Raspberry Pi 5

Figure II.1.Raspberry Pi 5	21
Figure II.2. Téléchargement de l'application Raspberry Pi Imager	25
Figure II.3.Affichage de l'interface de Raspberry Pi imager	25
Figure II. 4 Sélection du modèle compatible avec le Raspberry Pi 5	26
Figure II. 5. Interface montrant les différents systèmes proposés	27
Figure II. 6 . Choix de la carte mémoire pour l'installation	27
Figure II. 7 . Interface de configuration Raspberry Pi	28
Figure II.8. Écriture Réussie du Système Raspberry Pi OS	29
Figure II. 9 . Écran principal de Raspberry Pi	30
Figure II. 10 .Configuration d'une session SSH avec PuTTY	32
Figure II.12.Activation de SSH	33
Figure II.13.Confirmation de la configuration SSH	33
Figure II. 14. Accès aux options d'interface	34
Figure II.15.Activation du service VNC	34
Figure II.16.Confirmation de l'activation du service VNC	34
Figure II. 17. Interface RealVNC pour se connecter à Raspberry Pi	35

Chapitre III : Expérimentations et mise en œuvre pratique

Figure III.1.Connexion du Raspberry Pi avec ADS1115	39
Figure III.2.transmetteurs de pression	39
Figure III.3.Montage électrique	40
Figure III.4.Acquisition des données.	41
Figure III.5. Détection par AI	43
Figure III.6.Signal sans fuite	45

Figure III.7 Signal dérivé sans fuite.....	45
Figure III.8.Signal avec une fuite.....	46
Figure III.9.Signal dérivé avec une fuite.....	46
Figure III.10 Résultat de la classification automatique par le modèle d'IA.....	47
Figure III.11. Schématique diagramme of the Bi-GRU model.....	48
Figure III.12. Casse d'un clapet au cours des essais.....	51

Introduction générale

Introduction générale

Les réseaux de distribution d'eau constituent un élément essentiel de l'infrastructure de toute ville, garantissant l'approvisionnement en eau potable avec un débit suffisant et une pression adéquate. Cependant, ces réseaux sont confrontés au problème des fuites d'eau, qui affectent négativement l'efficacité de la distribution, entraînant des pertes importantes en eau, des coûts économiques élevés et des dommages environnementaux. Pour faire face à ce problème, il est nécessaire d'adopter des techniques efficaces permettant de détecter précisément les fuites et de localiser leur position rapidement afin de minimiser les pertes et d'améliorer la performance du réseau.

Les fuites peuvent être causées par plusieurs facteurs, tels que la corrosion des canalisations, la pression excessive, les vibrations mécaniques ou encore des défauts de fabrication. Dans de nombreux cas, ces fuites sont invisibles à l'œil nu, ce qui rend leur détection difficile avec les méthodes traditionnelles. C'est pourquoi les techniques modernes basées sur l'analyse des signaux provenant de transmetteurs jouent un rôle crucial dans l'amélioration des processus de détection des fuites. [3]

Dans ce projet, nous proposons l'utilisation de transmetteurs de pression pour la détection des fuites dans un réseau de canalisations en PEHD. Ces transmetteurs présentent une grande précision et ne sont pas affectés par le bruit ambiant, contrairement aux transmetteurs acoustiques traditionnels. La méthodologie adoptée repose sur la collecte et l'analyse des signaux de pression en utilisant la technique de corrélation croisée (*Cross-Correlation*) afin de déterminer avec précision l'emplacement des fuites.

D'un point de vue pratique, ce travail a été réalisé sur un modèle expérimental en laboratoire. Le système a été équipé d'un **Raspberry Pi 5** comme plateforme de traitement des données. Le système d'exploitation a été installé sur l'appareil, connecté à un écran et à un microcontrôleur pour un contrôle complet des paramètres, avec une explication détaillée de toutes les étapes d'installation et de configuration. Les signaux sont captés à l'aide de transmetteurs de pression fixés sur la canalisation, puis traités avec **Python** pour identifier avec précision les fuites. [7]

Structure du travail

Ce travail est organisé en trois chapitres principaux

- **Chapitre 1** Étude approfondie du problème des fuites, ses causes, ses impacts sur les réseaux d'eau, ainsi que les méthodes traditionnelles et modernes utilisées pour leur détection.
- **Chapitre 2** Présentation du *Raspberry Pi 5*, incluant l'installation du système d'exploitation, la connexion de l'écran et les logiciels utilisés pour le traitement des données.
- **Chapitre 3** Expérimentations en laboratoire, test du système proposé sur un modèle expérimental, analyse des données et évaluation de l'efficacité de la méthode proposée pour la détection des fuites.

Importance de la recherche

Ce travail vise à proposer une solution pratique et efficace pouvant être appliquée aux réseaux réels pour améliorer la détection des fuites et réduire les pertes d'eau. À travers cette étude, nous cherchons à développer une technique précise et fiable, basée sur des outils facilement accessibles, facilitant ainsi son application dans le domaine industriel. L'objectif est d'assurer une gestion plus efficace de l'eau tout en réduisant les coûts liés à la maintenance et aux fuites non détectées.

Chapitre I

Aperçu des réseaux de distribution d'eau et des fuites

Introduction [1]

Les réseaux de distribution d'eau jouent un rôle fondamental dans l'acheminement de l'eau potable vers les consommateurs. Ils constituent une composante essentielle des infrastructures urbaines, permettant de garantir un accès continu et sécurisé à cette ressource vitale. Cependant, ces réseaux sont confrontés à plusieurs défis, notamment le problème des fuites d'eau, qui engendrent d'importantes pertes en volume et en coût.

Les fuites d'eau résultent de divers facteurs, tels que le vieillissement des canalisations, les variations de pression ou encore les conditions environnementales défavorables. Ces pertes affectent non seulement la disponibilité de l'eau potable, mais aussi l'économie et la gestion durable des ressources hydriques. Pour y remédier, plusieurs techniques de détection des fuites ont été développées, allant des méthodes traditionnelles, comme l'écoute acoustique et l'inspection visuelle, aux approches modernes reposant sur l'intelligence artificielle et les transmetteurs intelligents.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les principes de base des réseaux de distribution d'eau, en abordant leurs composants et leur fonctionnement. Ensuite, nous analyserons les causes et les conséquences des fuites d'eau dans ces réseaux. Enfin, nous exposerons les différentes approches de détection des fuites, en mettant en évidence les limites des méthodes classiques et les avantages des nouvelles technologies.

I 1. Définition des réseaux de distribution d'eau [2]

Un réseau de distribution d'eau est un système intégré d'infrastructures visant à transporter l'eau des stations de traitement jusqu'aux consommateurs finaux, tout en garantissant la qualité de l'eau et une pression adéquate.

Ces réseaux sont conçus de manière à assurer une distribution continue et sécurisée de l'eau, en minimisant autant que possible les pertes et les fuites.

Ce système comprend un ensemble de canalisations, de vannes, de réservoirs et de stations qui fonctionnent ensemble pour assurer une distribution efficace et efficiente de l'eau vers les différentes zones de consommation.

I 2. Type de réseau [2]

On distingue principalement le réseau ramifié, le réseau maillé et le réseau étagée

I 2.1 le réseau ramifié

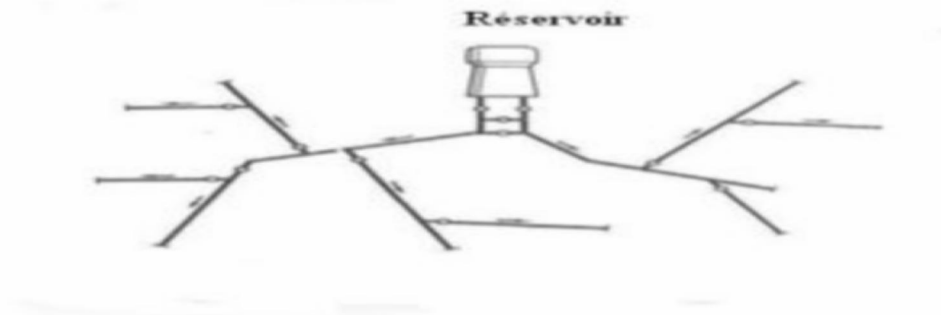


Figure I.1 : Le réseau ramifié

Les réseaux ramifiés sont économiques mais les conduites ne comportent aucune alimentation. Il manque de sécurité et de souplesse en cas de rupture. Un accident dans la conduite principale prive l'eau à tous les abonnés en aval. Ce type de réseau est généralement opté pour les zones rurales vu que le type d'habitation est dispersé et aéré par la présence d'espace ou de terrains agricoles.

I 2.2 le réseau maillé

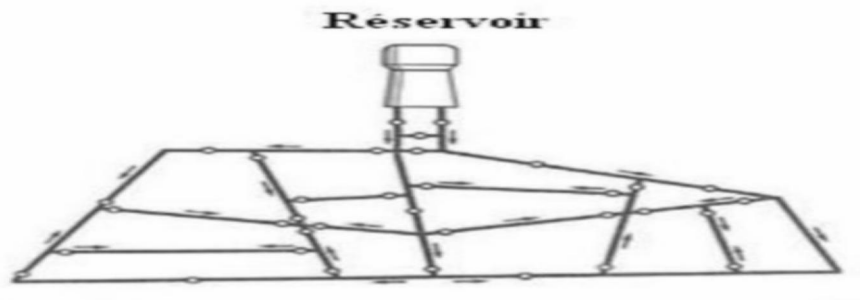


Figure I.2. Le réseau maillé

Les réseaux maillés permettent une alimentation en retour. En cas d'accident, une simple manœuvre des robinets permet d'isoler les tronçons atteints et poursuivre une alimentation des abonnés en aval, ce réseau est plus coûteux mais meilleur que le réseau ramifié

I 2.3 Les réseaux étagés



Figure I .3. Les réseaux étagés

I 2.4 Réseau mixte

Un réseau mixte (ramifié et maillé) lorsqu'il est constitué d'une partie ramifiée et une autre maillée. Ce type de schéma est utilisé pour desservir les quartiers en périphérie de la ville par les ramifications issues des mailles utilisées dans le centre-ville

I 3. Types de fuites dans les réseaux de distribution d'eau[3]

Les réseaux de distribution d'eau sont confrontés à de nombreux défis, et l'un des plus critiques est la perte d'eau due aux fuites. Ces pertes, parfois invisibles, entraînent des conséquences économiques et environnementales graves. Il existe plusieurs types de fuites, classées selon leur visibilité, leur emplacement et les causes qui les provoquent.

I 3.1 Fuites visibles (Fuites apparentes)



Ces fuites sont facilement détectables à l'œil nu. Elles apparaissent généralement à la surface du sol sous forme de flaques, de jets d'eau, ou d'humidité constante. Leur présence est souvent révélée par des traces d'eau en pleine rue ou près des bâtiments.

Figure I.4.Fuite visible

I 3.2 Fuites non visibles (Fuites non apparentes)

Contrairement aux précédentes, ces fuites sont difficiles à repérer car l'eau s'infiltré discrètement dans le sol ou à l'intérieur des structures sans laisser de signes évidents. Elles peuvent persister pendant des mois sans être détectées, causant des dégâts invisibles mais importants.

I 3.3 Fuites ponctuelles

Ce sont des fuites localisées dans une zone bien précise du réseau, souvent liées à une rupture soudaine ou à un dommage mécanique sur un point spécifique comme une conduite ou un

raccord. Ce type de fuite est généralement isolé mais peut se répéter fréquemment dans les vieux réseaux.



Figure I. 5. Fuites ponctuelles

I 3.4 Fuites diffuses ou généralisée

Elles sont réparties sur une large portion du réseau et sont souvent dues à une dégradation générale des infrastructures. Ces fuites ne se manifestent pas forcément par un écoulement visible, mais elles entraînent une perte continue et généralisée de l'eau à travers tout le réseau.



Figure I. 6. Fuites diffuses

I 3.5 Fuites dans les réservoirs (trop-plein)

Ces fuites apparaissent lorsqu'un réservoir déborde, souvent à cause d'un mauvais fonctionnement du système de contrôle du niveau d'eau, comme un flotteur ou un capteur défaillant. Bien que leur origine soit simple, elles peuvent entraîner des pertes constantes si elles ne sont pas corrigées rapidement.

I 3.6 Fuites causées par des branchements illégaux ou mal exécutés

Ce type de fuite résulte de connexions non autorisées ou mal réalisées, souvent hors des normes techniques. Ces installations artisanales sont fragiles et sujettes aux fuites. En plus, elles ne figurent pas sur les plans officiels, ce qui rend leur détection et leur réparation complexes.

I 4. Causes des fuites d'eau dans les réseaux [1]

Les réseaux de distribution d'eau rencontrent de nombreuses contraintes techniques, dont les fuites représentent l'un des problèmes les plus récurrents. Ces pertes d'eau ont des répercussions significatives sur le rendement du réseau ainsi que sur la gestion durable des ressources hydriques. L'étude de ce phénomène, à travers l'identification de ses causes, constitue une étape essentielle pour améliorer l'efficacité des systèmes de distribution et limiter les pertes en eau

I 4.1 Corrosion et vieillissement des matériaux

Avec le temps, les canalisations, surtout métalliques, s'usent sous l'effet de l'humidité, de la pression et des agents chimiques présents dans le sol et l'eau.



Figure I. 7. Corrosion des matériaux

I 4.2 Surpression ou fluctuations de pression dans le réseau

Une pression excessive ou irrégulière peut provoquer des fissures, des ruptures ou l'éclatement des conduites et raccords.

I 4.3 Mouvements du sol et vibrations

Les vibrations causées par le passage fréquent de véhicules lourds ou par des travaux de chantier à proximité peuvent fragiliser les conduites souterraines.

I 4.4 Raccords défectueux ou mal installés

Une mauvaise exécution lors de l'installation ou un affaiblissement des joints avec le temps peut entraîner des fuites.

I 4.5 Absence d'entretien préventif

Négliger la maintenance du réseau favorise l'apparition progressive de fuites difficiles à détecter avant qu'elles ne deviennent graves.

I 4.6 Pannes techniques ou chocs accidentels

Une vanne cassée, un robinet endommagé, ou un coup violent sur une canalisation peuvent causer une fuite immédiate.

I 4.7 Défaillance des systèmes de contrôle dans les réservoirs

Si le système de régulation du niveau d'eau ne fonctionne plus, le trop-plein peut entraîner une perte constante.

I 4.8 Branchements clandestins

Non seulement ils sont illégaux, mais ils sont aussi souvent mal conçus, ce qui augmente le risque de fuite.

I 5. Les fuites d'eau en Algérie [4]

En Algérie, les fuites d'eau dans les réseaux de distribution représentent un problème structurel profond qui impacte directement la disponibilité de cette ressource vitale. Chaque jour, des milliers de mètres cubes d'eau potable sont gaspillés avant même d'atteindre les foyers, à cause de canalisations anciennes, de matériaux détériorés, ou encore de raccordements anarchiques.

Dans certaines grandes villes comme Alger, on estime que près de 40 % de l'eau produite est perdue dans le réseau. Ce taux alarmant traduit non seulement un gaspillage massif, mais

également une pression accrue sur des ressources hydriques déjà limitées. À l'échelle nationale, ces pertes cumulées se comptent en millions de mètres cubes par an, ce qui pèse lourdement sur la capacité du pays à répondre aux besoins croissants de la population.

Les conséquences de ces pertes sont multiples. Elles engendrent une baisse notable de la pression dans les robinets, des coupures fréquentes, et une inégalité d'accès à l'eau entre les zones urbaines et rurales. Elles entraînent aussi une augmentation des coûts d'exploitation, car l'eau qui est pompée, traitée et transportée est en grande partie perdue avant même d'être consommée.

Ce phénomène aggrave aussi le stress hydrique, surtout en période de sécheresse ou durant les pics de consommation estivaux. Dans certaines régions, il devient de plus en plus difficile de garantir un approvisionnement régulier, et les populations sont souvent contraintes à stocker l'eau ou à recourir à des sources alternatives, parfois non contrôlées.

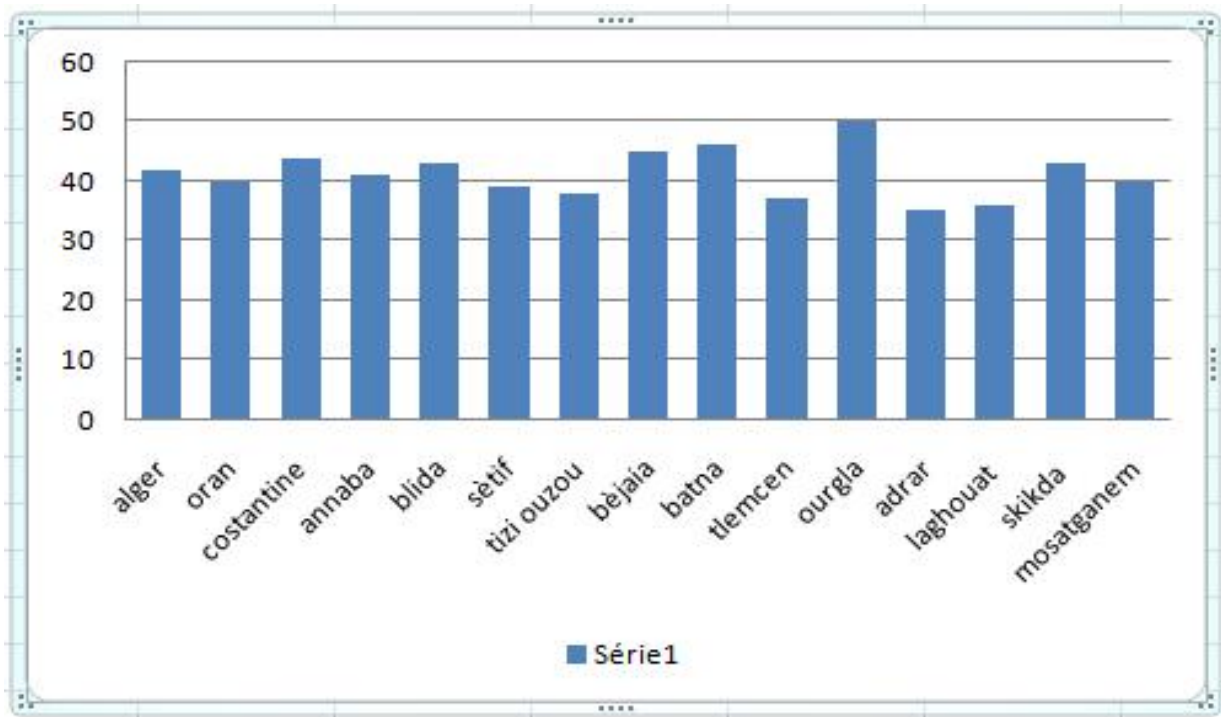


Figure I. 8 . Statistiques des fuites d'eau

I 6. Les fuites d'eau dans le monde [5]

Il est estimé qu'à l'échelle mondiale, plus de 126 milliards de mètres cubes d'eau sont perdus chaque année en raison des fuites dans les réseaux de distribution.

Cette quantité considérable, bien qu'elle ait été traitée et pompée, n'atteint jamais les utilisateurs finaux, ce qui engendre des pertes économiques évaluées à environ 39 milliards de dollars américains par an. Ces pertes constituent un véritable fardeau pour les opérateurs de services d'eau ainsi que pour les économies nationales, en particulier dans les pays où les ressources en eau sont limitées.

D'autre part, le phénomène des "eaux non facturées" (ou NRW - Non-Revenue Water) désigne l'ensemble des volumes d'eau produits mais qui ne génèrent aucun revenu pour les exploitants. Cela inclut les pertes physiques dues aux fuites,

Les usages illicites de l'eau ainsi que les erreurs de mesure ou de facturation. Dans certains pays, notamment en développement, cette proportion peut atteindre 47 %, révélant ainsi un déséquilibre majeur entre la quantité d'eau produite et celle effectivement utilisée de manière légitime et mesurée.

En outre, les fuites représentent la part la plus importante des pertes totales enregistrées dans les réseaux d'approvisionnement. Des études récentes démontrent qu'environ 70 % des pertes en eau sont directement liées aux fuites.

Cette réalité met en évidence la nécessité urgente de moderniser les infrastructures, d'améliorer la gestion technique des réseaux et de renforcer les efforts de détection proactive des anomalies hydrauliques.

I 7. Les impacts économiques des fuites dans les réseaux de distribution d'eau

Les pertes d'eau dans les réseaux de distribution ont des conséquences économiques sérieuses sur la gestion et la pérennité des services publics. Ces fuites, bien qu'elles puissent sembler techniques au départ, finissent par créer des déséquilibres financiers notables. Voici une analyse approfondie des effets les plus marquants

I 7.1. Perte d'eau sans revenu associé (Eau non facturée)

Lorsqu'une fuite se produit, l'eau qui s'échappe a déjà été traitée et acheminée, ce qui signifie que des coûts ont été engagés, mais sans aucune contrepartie financière. Ce volume d'eau, appelé "eau non facturée", représente une perte directe de revenus pour l'exploitant, et cette situation nuit à la rentabilité du service.

I 7.2. Charges de maintenance en hausse

La répétition des fuites implique des interventions fréquentes sur le réseau. Chaque réparation nécessite la mobilisation de techniciens, de matériel, et parfois de gros engins. Ces opérations, qui deviennent presque routinières, finissent par alourdir considérablement les dépenses de fonctionnement, et limitent la capacité à planifier sur le long terme.

I 7.3 Consommation énergétique excessive

Pour compenser les pertes, les systèmes de pompage sont souvent contraints de fonctionner plus longtemps ou à un débit plus élevé. Cela entraîne une hausse significative de la consommation électrique, ce qui impacte les coûts énergétiques du service et accentue les dépenses inutiles.

I 7.4 Coût de production de l'eau plus élevé

Moins il y a d'eau livrée aux usagers, plus le coût de chaque mètre cube utile augmente. Les frais fixes (salaires, énergie, produits de traitement...) restent les mêmes, mais sont répartis sur un volume plus faible, ce qui réduit l'efficacité économique du service.

I 7.5 Déséquilibre budgétaire de l'organisme gestionnaire

À force de gérer des urgences imprévues, l'entreprise ne parvient plus à suivre son plan financier initial. Les dépenses supplémentaires liées aux fuites affectent la trésorerie, ce qui empêche souvent l'investissement dans de nouvelles technologies ou dans l'extension du réseau.

I 7.6 Nécessité d'exploiter d'autres ressources en eau

Dans certaines situations, lorsque les pertes deviennent trop importantes, l'opérateur est obligé de chercher d'autres sources d'approvisionnement pour répondre à la demande. Ce

choix implique des investissements lourds en études, en infrastructures et en énergie, ce qui aggrave encore les coûts.

I 7.7 Perte de valeur des investissements réalisés

L'eau perdue a déjà consommé des ressources elle a été pompée, traitée, transportée... Toute cette chaîne de production repose sur des investissements coûteux. Chaque litre qui fuit équivaut à un gaspillage de ces efforts et de ces fonds, ce qui diminue l'efficacité globale du système.

I 7.8 Retard dans le développement du réseau

Les moyens financiers et techniques sont souvent détournés vers la gestion des fuites, au lieu d'être utilisés pour améliorer ou étendre le réseau. Ce retard peut empêcher certaines zones d'être desservies, ou ralentir la modernisation nécessaire du système.

I 7.9 Réduction de la crédibilité institutionnelle

Un taux de pertes élevé donne une image de mauvaise gestion aux yeux des partenaires financiers. Cela peut entraîner une perte de confiance, voire une réticence à investir ou à accorder des financements supplémentaires pour des projets futurs.

I 7.10 Allocation inefficace des ressources internes

Les équipes techniques sont constamment sollicitées pour résoudre les mêmes types de pannes. Cette répétition empêche une planification efficace et consomme du matériel de façon prématurée. Au final, l'organisation fonctionne en mode réactif, au lieu de se projeter dans l'amélioration continue.

I 8. Techniques traditionnelles de détection des fuites [6]

Les techniques traditionnelles de détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau sont considérées comme des méthodes essentielles utilisées avant l'avènement des technologies modernes. Bien qu'elles soient simples, elles ont joué un rôle important dans la gestion des réseaux d'eau, mais elles rencontrent de nombreux défis, notamment pour détecter les fuites petites ou enterrées.

Inspection visuelle

L'inspection visuelle est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus utilisées pour détecter les fuites. Cette méthode repose sur l'observation des zones suspectes pour rechercher des signes apparents tels que l'humidité, les accumulations d'eau anormales, la formation de moisissures sur les murs ou le sol, ou le changement de couleur des revêtements. Cette méthode est particulièrement appliquée dans les zones exposées ou au-dessus des conduites facilement accessibles. Cependant, son efficacité est limitée car elle repose uniquement sur les signes visibles, ce qui la rend inefficace pour détecter les fuites profondes ou enterrées sous les trottoirs et les routes. De plus, les signes de fuites peuvent être confondus avec d'autres phénomènes tels que les eaux de pluie ou une humidité naturelle élevée dans certaines zones, ce qui peut entraîner des erreurs de diagnostic.

Coloration de l'eau

La technique de coloration de l'eau est utilisée comme méthode traditionnelle pour localiser les fuites en ajoutant des colorants non toxiques dans l'eau du réseau. Les techniciens surveillent les zones où le colorant apparaît à la surface, ce qui aide à déterminer le parcours de la fuite avec plus de précision. Cette méthode est utile dans les réseaux petits ou lorsqu'il est nécessaire de localiser des fuites proches de la surface. Cependant, elle rencontre plusieurs difficultés, surtout dans les réseaux vastes et complexes, où la concentration du colorant peut être diluée par l'écoulement de l'eau ou se mélanger avec d'autres eaux, ce qui rend le suivi difficile et imprécis. De plus, cette méthode nécessite une surveillance continue pendant une période prolongée pour observer l'apparition des marques colorées, ce qui limite son utilisation dans certains cas.

Test de débit manuel

Le test de débit manuel est une méthode traditionnelle qui consiste à mesurer la quantité d'eau qui s'écoule à travers des sections spécifiques du réseau et à la comparer avec les valeurs théoriques ou les prévisions basées sur la consommation des utilisateurs. Toute diminution de la quantité d'eau peut indiquer la présence d'une fuite dans une partie du réseau. Cette méthode nécessite une connaissance précise de la configuration du réseau hydraulique et de la carte de distribution de l'eau, et elle dépend fortement de l'expérience des opérateurs qui réalisent les mesures. Cependant, son application reste complexe et consomme beaucoup de

temps, surtout dans les réseaux vastes ou ramifiés. De plus, elle est sujette à des erreurs dues à des variations soudaines de la consommation d'eau ou à des erreurs humaines lors de la collecte des données

Mesure acoustique

La mesure acoustique est utilisée comme méthode de détection des fuites en captant les sons générés par le mouvement de l'eau qui fuit dans les conduites sous pression. Cette méthode repose sur des dispositifs sensibles capables de détecter les vibrations sonores à travers le sol ou les surfaces. Lorsqu'une fuite se produit, l'eau émet un son distinct qui peut être enregistré et analysé à l'aide d'appareils spécialisés tels que des microphones souterrains ou des détecteurs acoustiques. Bien que cette méthode offre une précision plus élevée par rapport à l'inspection visuelle, son efficacité peut être affectée par plusieurs facteurs techniques, tels que le type de matériau de la conduite, la profondeur du sol au-dessus de la conduite et le bruit ambiant. De plus, cette méthode nécessite une formation spécialisée des opérateurs pour analyser les sons et distinguer les bruits provenant des fuites de ceux provenant d'autres sources.



Figure I. 9. Mesure acoustique

Test de pression

Le test de pression est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour déterminer la présence de fuites dans les réseaux d'eau. Cela implique de mesurer la pression de l'eau dans les conduites et de suivre son évolution au fil du temps.

En cas de fuite, une diminution anormale de la pression indique une perte d'eau dans le réseau. Bien que cette technique soit simple à mettre en œuvre, son efficacité se limite à la détection de la présence de fuites sans indiquer précisément leur localisation.

De plus, la baisse de pression peut parfois résulter d'autres facteurs, tels que des variations naturelles de la consommation ou l'ouverture de nouvelles vannes dans le réseau, ce qui pourrait conduire à des conclusions erronées si les résultats ne sont pas analysés avec soin.



Figure I. 10. Test de pression

Surveillance de l'humidité

La technique de surveillance de l'humidité est utilisée comme méthode traditionnelle pour localiser les fuites en observant les variations du taux d'humidité dans le sol ou les structures autour des conduites. Toute augmentation inexplicée du niveau d'humidité peut être un indicateur de fuite d'eau. Cette méthode est particulièrement utile dans les environnements secs, où la détection de toute humidité excessive est plus facile et plus évidente. Cependant, cette méthode présente plusieurs limitations, la principale étant que les sources d'humidité ne sont pas nécessairement liées à des fuites d'eau, mais peuvent être dues à des causes naturelles telles que la condensation ou d'autres types de fuites non liées au réseau d'eau. De plus, cette méthode ne permet pas de déterminer précisément l'emplacement ou la taille de la fuite.

Analyse des données des compteurs

L'analyse des données des compteurs est utilisée comme méthode indirecte pour détecter les fuites, en comparant les quantités d'eau fournies aux quantités enregistrées comme consommées dans des zones spécifiques du réseau. Toute différence notable entre les deux quantités peut indiquer une perte d'eau due à une fuite. Cette méthode est principalement utile dans les petits réseaux ou dans des zones résidentielles spécifiques. Cependant, son efficacité diminue dans les réseaux vastes et complexes, en particulier si les compteurs ne sont pas précis ou s'il existe des différences dans le temps de collecte des données. De plus, l'analyse des écarts ne fournit aucune information sur la localisation de la fuite, ce qui nécessite l'utilisation d'autres méthodes pour la localiser.

Détection manuelle avec des outils simples

Des outils simples traditionnels, tels que des tiges métalliques ou des fils flexibles, sont utilisés comme méthodes manuelles pour détecter les changements dans le sol ou dans l'eau causés par les fuites. Certains ouvriers de terrain utilisent ces outils pour essayer de sentir la résistance du sol ou les vibrations résultant du passage de l'eau. Bien qu'ils puissent parfois aider à détecter de manière préliminaire les fuites, ces méthodes manquent de précision scientifique et ne donnent pas de résultats fiables. Souvent, leurs résultats sont aléatoires et dépendent fortement de l'expérience et des compétences de l'opérateur, ce qui les rend inadaptées pour des travaux nécessitant des niveaux élevés de précision et de fiabilité.

Conclusion

Bien que les techniques traditionnelles soient largement utilisées pour la détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau, elles n'ont pas permis d'obtenir les résultats escomptés de manière efficace. Des méthodes telles que l'inspection visuelle ou l'écoute acoustique sont couramment employées, mais elles manquent souvent de précision et de rapidité pour détecter les fuites, car elles dépendent largement de l'expérience humaine et sont sujettes à des erreurs. De plus, ces techniques sont coûteuses et nécessitent un temps considérable pour effectuer les inspections, ce qui les rend peu adaptées dans de nombreux cas.

Face à ces défis, il devient impératif de rechercher des solutions plus avancées et efficaces.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons une technologie innovante utilisant Raspberry Pi 5, qui constitue une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité de la détection des fuites.

Nous explorerons comment cette technologie tire parti de la puissance de calcul du Raspberry Pi pour fournir des solutions plus rapides et plus précises pour la détection précoce des fuites dans les réseaux.

CHAPITRE II

Étude des performances du Raspberry Pi 5



Introductionⁱ

Le Raspberry Pi est un micro-ordinateur révolutionnaire développé par la Raspberry Pi Foundation (2009) pour démocratiser l'informatique et la programmation, notamment dans les pays en développement. Depuis le premier modèle lancé en 2012, il a transformé le prototypage électronique, l'éducation technologique et divers secteurs industriels. Compact et peu coûteux, il permet de réaliser des projets variés allant de l'apprentissage de base jusqu'à la domotique, l'automatisation industrielle ou les objets connectés.

Les modèles les plus connus incluent le Raspberry Pi 3, populaire pour l'IoT grâce à sa connectivité sans fil, et le Raspberry Pi 4, offrant plus de puissance et de mémoire. Il fonctionne principalement sous Raspberry Pi OS, mais peut aussi exécuter d'autres systèmes. Son port GPIO permet de contrôler de nombreux dispositifs physiques (capteurs, caméras, moteurs, etc.), ce qui en fait un outil prisé dans l'éducation, la recherche et le prototypage rapide. La grande communauté d'utilisateurs contribue à son succès par le partage de projets, tutoriels et extensions open source. contrôleur d'imprimante 3D, dispositifs de sécurité, ou bien en tant que cerveau de robot autonome. Son faible encombrement physique, sa consommation énergétique réduite et son coût d'entrée extrêmement bas le rendent également très attractif pour les déploiements massifs, tels que les transmetteurs environnementaux répartis sur une large zone géographique ou les systèmes de collecte de données dans des régions reculées.

In spite of its small size, the Raspberry Pi keeps on asserting itself as a serious platform that can compete in some tasks with much larger and costlier computers. It is the personification of the DIY (do-it-yourself) and learn-by-doing ideology. It is also a human-scale technology innovation driver where creativity is more paramount than material resource. So, the Raspberry Pi is not only a micro-computer — it's an educational device, an experimentation lever, and a genuine bridge between the digital and physical worlds, which continues to inspire generations of makers around the globe.



Figure II.1. Raspberry Pi 5

II.1. Qu'est-ce que Raspberry Pi 5ⁱⁱ

Le Raspberry Pi 5 (Figure II. 1) est un système de calcul compact multilingue rangé dans la catégorie des systèmes informatiques à faible consommation de ressources (Low-power computing systems). Il trouve largement sa place dans l'enseignement, les sciences de la recherche et les systèmes embarqués au développement. La cinquième génération de la gamme Raspberry Pi est une amélioration sensible à tous les niveaux architectural et

technologique, conçue pour répondre aux besoins des applications complexes qui combinent haute performance et efficacité énergétique. Elle offre un cadre flexible à l'adaptation pour prototypage rapide, automatisation, applications d'Internet des objets (IoT) et traitement distribué tout en maintenant une accessibilité parfaite à la destination éducative ainsi que dans les projets à la main. Les Raspberry Pi 5 sont donc un modèle proche d'informatique miniaturisée, l'illustration de l'équilibre entre une conception à petit coût et la possibilité d'exécuter des opérations informatiques complexes dans un format réduit et évolué.

II.2. Spécifications du Raspberry Pi 5ⁱⁱⁱ

- **Processeur** Broadcom BCM2712, processeur quadricœur 64 bits Arm Cortex-A76 à 2,4 GHz, avec extensions cryptographiques, mémoire cache L2 de 512 Ko par cœur et cache L3 partagé de 2 Mo.
- **Processeur graphique** GPU VideoCore VII, prenant en charge OpenGL ES 3.1 et Vulkan 1.2.
- **Affichage** Double sortie micro HDMI® 4K à 60 images par seconde, avec prise en charge du HDR.
- **Décodage vidéo** Décodeur HEVC 4Kp60.
- **Mémoire** SDRAM LPDDR4X-4267 (modèles 4 Go et 8 Go disponibles au lancement).
- **Connectivité sans fil** Wi-Fi® double bande 802.11ac.
- **Bluetooth** Bluetooth 5.0 / Bluetooth Low Energy (BLE).
- **Stockage** Lecteur de carte microSD, compatible avec le mode haute vitesse SDR104.
- **Ports USB** 2 × ports USB 3.0 (vitesse jusqu'à 5 Gbit/s simultanée)
- 2 × ports USB 2.0
- **Réseau** Ethernet Gigabit, avec prise en charge PoE+ (nécessite un module PoE+ HAT séparé).
- **Interfaces caméra/écran** 2 × émetteurs-récepteurs MIPI à 4 voies (caméras ou écrans).
- **Extension** Interface PCIe 2.0 x1 pour périphériques rapides (nécessite un module M.2 HAT ou autre adaptateur).
- **Alimentation** 5V / 5A via port USB-C, avec prise en charge Power Delivery.
- **En-tête GPIO** Connecteur standard à 40 broches du Raspberry Pi.
- **Horloge temps réel (RTC)** Intégrée, alimentée par une batterie externe.
- **Bouton d'alimentation** Présent sur la carte pour une mise sous/hors tension sécurisée.
- **Sortie audio** Prise jack 3,5 mm (audio stéréo + vidéo composite).
- **Connecteur pour ventilateur** Présent pour gestion active du refroidissement.

II.3. Étapes de configuration initiale du Raspberry Pi 5

Configurer un Raspberry Pi 5 est un processus simple qui peut être réalisé en suivant quelques étapes faciles. Voici un guide étape par étape

II.3.1. Les composants nécessaires^{iv}

Avant de commencer la configuration, il est important de rassembler tous les composants nécessaires. Voici la liste du matériel requis

Carte mémoire La carte mémoire (carte microSD) est le lecteur où est stocké le système d'exploitation du Raspberry Pi 5. Elle existe en différentes formes de capacités, comme 16 Go, 32 Go ou 64 Go. Un adaptateur peut être utilisé pour insérer la carte microSD sur les lecteurs SD traditionnels



Clavier et souris Le Raspberry Pi n'a pas besoin d'une souris et d'un clavier pour contrôler le système d'exploitation comme l'ordinateur. Bien qu'il n'en soit pas nécessaire pour certains projets, vous en aurez besoin quand vous allumerez votre Raspberry Pi pour la première fois.



L'écran Il est nécessaire de disposer d'un écran pour installer le système pour la première fois et afficher le bureau. Cependant, il est possible de se passer de l'écran dans certains cas en utilisant d'autres moyens, tels que le contrôle à distance (nous en parlerons dans les pages suivantes). De plus, le Raspberry Pi 5 est capable d'afficher en résolution 4K, via un câble micro HDMI vers HDMI disponible sur les appareils modernes. Si l'écran que vous utilisez ne prend pas en charge la fonctionnalité HDMI, vous aurez besoin d'un adaptateur HDMI vers VGA.



Câble micro HDMI-VGA Les écrans qui ne sont pas équipés de port micro HDMI sont des modèles plus anciens. Dans ce cas, il est essentiel d'utiliser un adaptateur de micro HDMI vers VGA.



Une source d'alimentation Le Raspberry Pi 5 se peut alimenter à partir de n'importe quel chargeur USB-C. Le chargeur doit pouvoir délivrer une tension de 5 volts et un courant d'au moins 5 ampères (5 A), afin de garantir une bonne marche et sans incident, notamment à l'utilisation des ports USB, puisque ceux-ci consomment une certaine quantité d'énergie. Il est aussi possible faire usage d'une batterie externe (power bank) en tant que source d'alimentation portable.



Câble micro HDMI Le Raspberry Pi 5 utilise deux ports micro HDMI. Il faut donc un câble micro HDMI vers HDMI pour le connecter à un écran moderne.



Câble réseau (optionnel) Le câble réseau est utilisé pour connecter le Raspberry Pi sur le réseau local et sur Internet.



Connexion Wi-Fi (optionnel) Utilisé pour se connecter à Internet sans fil.



II.3.2. Téléchargez l'installateur^v

- Insérez la carte microSD dans votre ordinateur, à l'aide d'un adaptateur microSD/SD ou d'un adaptateur microSD/USB (disponible à la bibliothèque).
- Télécharger et installer le Raspberry Pi Imager <https://www.raspberrypi.com/software/>(Figure II. 2)

Install Raspberry Pi OS using Raspberry Pi Imager

Raspberry Pi Imager is the quick and easy way to install Raspberry Pi OS and other operating systems to a microSD card, ready to use with your Raspberry Pi. [Watch our 45-second video](#) to learn how to install an operating system using Raspberry Pi Imager.

Download and install Raspberry Pi Imager to a computer with an SD card reader. Put the SD card you'll use with your Raspberry Pi into the reader and run Raspberry Pi Imager.

[Download for Windows](#)

[Download for macOS](#)

[Download for Ubuntu for x86](#)

To install on **Raspberry Pi OS**, type `sudo apt install rpi-imager` in a Terminal window.



Figure II.2. Téléchargement de l'application Raspberry Pi Imager

II.3.3. Installer le système d'exploitation^{vi}

- Ouvrir l'application Raspberry Pi Imager (Figure II. 3)



Figure II.3. Affichage de l'interface de Raspberry Pi imager

- Choisir le modèle qui convient à Raspberry Pi 5 (Figure II. 4)

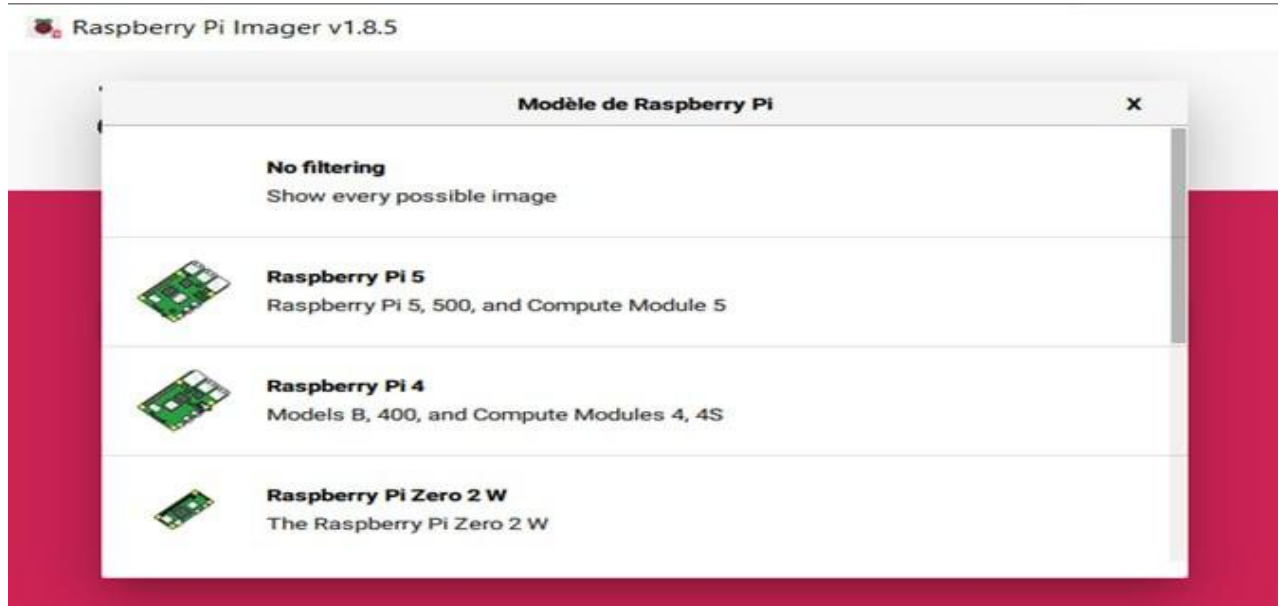


Figure II. 4 Sélection du modèle compatible avec le Raspberry Pi 5

- Choisir le système qui vous convient Raspberry Pi OS (64-bit) (recommandé), un choix

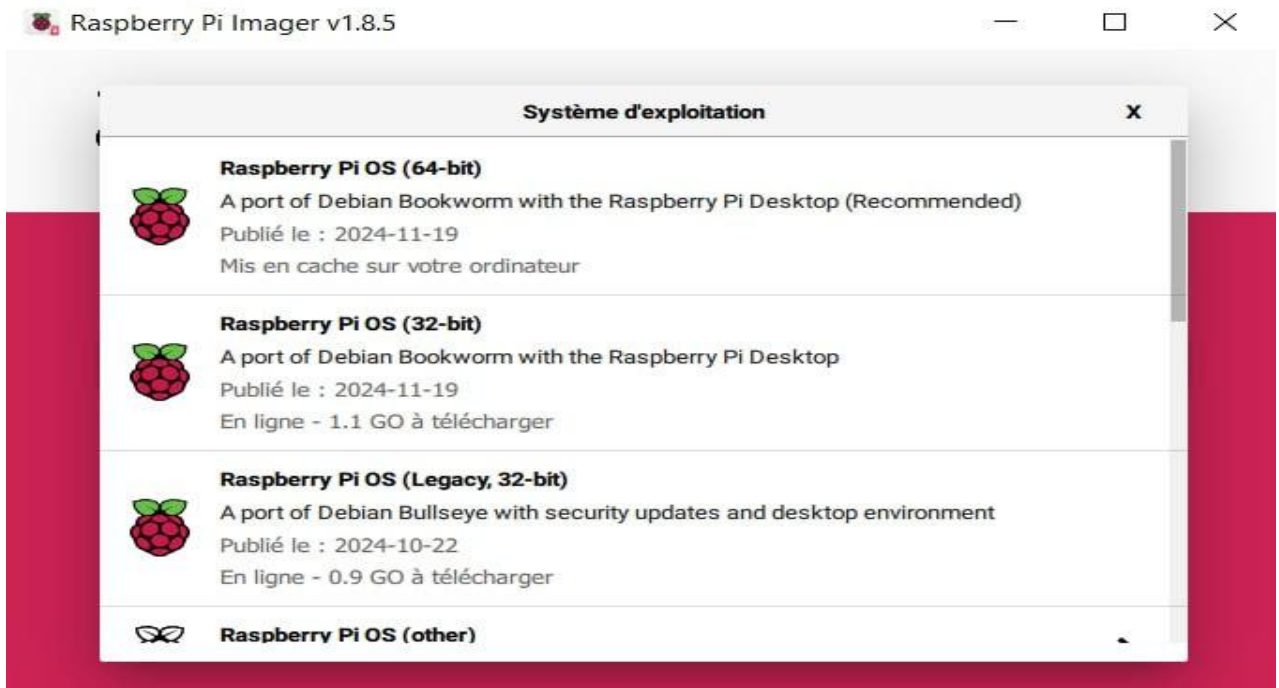


Figure II. 5. Interface montrant les différents systèmes proposés

- parmi la liste des systèmes (Figure II. 5)



Figure II. 6 . Choix de la carte mémoire pour l'installation

- On choisit la carte mémoire pour y installer le système d'exploitation (Figure II. 6)
- Après avoir cliqué sur "Next", une fenêtre s'affiche contenant le bouton "Edit settings". En cliquant dessus, l'utilisateur peut modifier les paramètres par défaut du système d'exploitation. (Figure II.7)

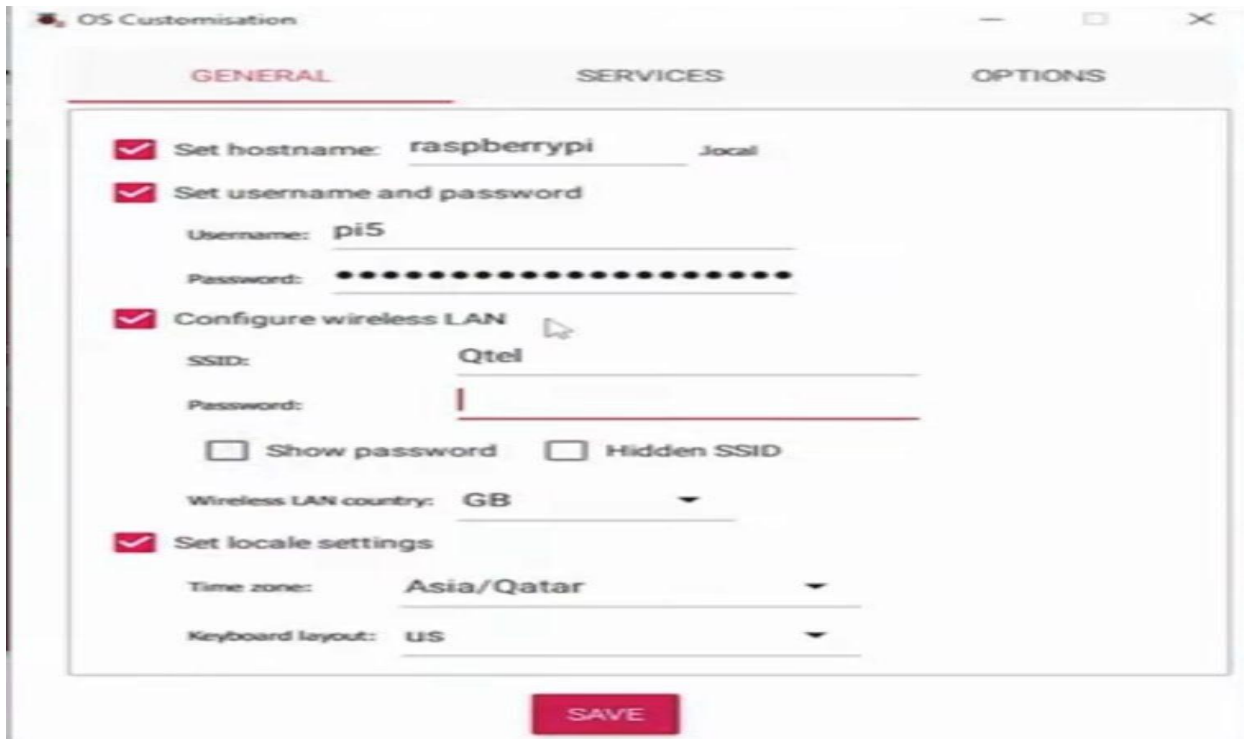


Figure II. 7 . Interface de configuration Raspberry Pi

- Après avoir configuré les paramètres, cliquez sur "Save".

Ensuite

- Une fenêtre de confirmation apparaît, cliquez sur "Yes".
- Une fenêtre d'alerte concernant la suppression des données de la carte apparaît, cliquez à nouveau sur "Yes".
- Le processus de gravure du système et d'application des paramètres commence automatiquement.
- Après quelques minutes, un message confirmant le succès de l'opération apparaît "Write Successful". (Figure II. 8)

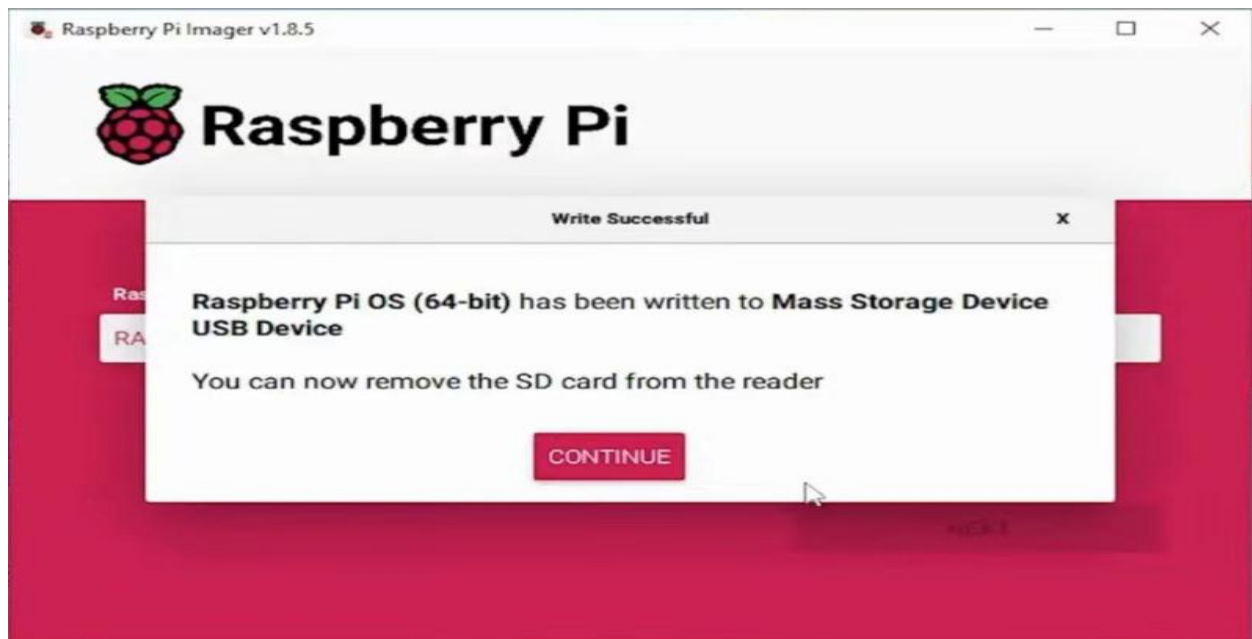


Figure II.8. Écriture Réussie du Système Raspberry Pi OS

- Vous pouvez maintenant retirer la carte mémoire en toute sécurité de l'ordinateur.

II.3.4. Démarrage du Raspberry Pi

Le Raspberry pi peut être démarré de deux façons différentes, selon les besoins

II.3.4.1. Démarrage avec écran (mode direct)^{vii}

Après avoir terminé le transfert du système d'exploitation sur la carte Mémoire, nous assemblons et installons tous les accessoires Nécessaire pour faire fonctionner le Raspberry Pi.

- Insertion de la carte mémoire dans son slot dédié sur la carte Raspberry Pi
- Connection d'alimentation par port MicroUSB
- Connection de la souris et du clavier

- Connection de la carte HDMI on la Raspberry Pi, puis en connectant le côté opposé à l'écran
- Couplage de l'alimentation électrique

Après avoir terminé les étapes, l'appareil démarre automatiquement. Tout d'abord, l'écran d'accueil de Raspbian apparaîtra.

Après quelques instants, l'interface des paramètres de configuration s'affichera, où vous pourrez ajuster la langue, connecter le réseau et mettre à jour le système, afin que l'appareil soit prêt à l'emploi. Que l'appareil soit prêt à l'emploi

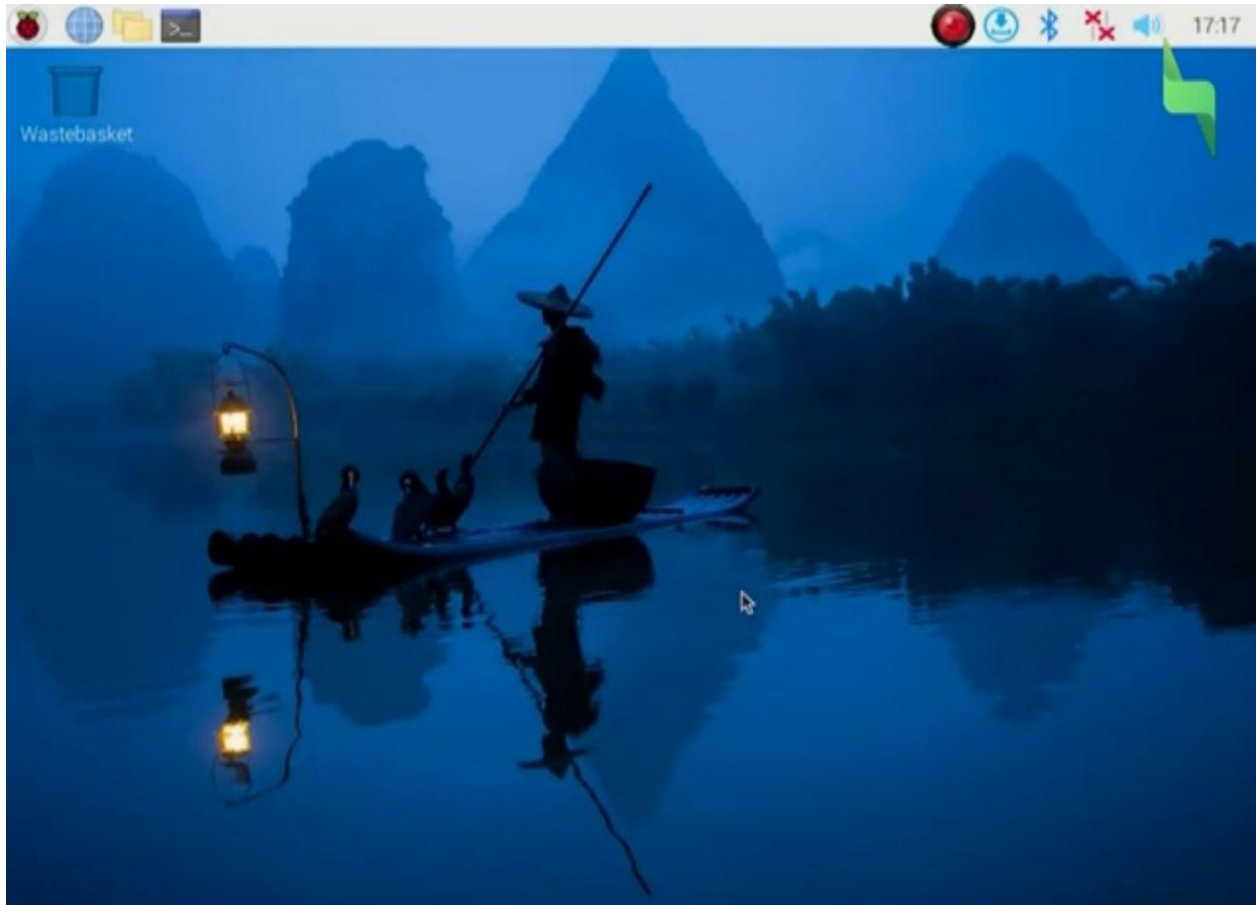


Figure II. 9 . Écran principal de Raspberry Pi

II.3.4.2. Démarrage et contrôle du Raspberry Pi à distance (sans écran)^{viii}

Pour cette méthode, vous aurez besoin

- Une carte microSD avec le système installé
- Une alimentation pour le Raspberry Pi
- Un accès réseau (Ethernet câblé ou Wi-Fi)

Il n'y a pas besoin de brancher un écran, un clavier ou une souris.

Le contrôle est effectué à distance via SSH ou VNC depuis une autre machine.

II.3.4.2.1. Contrôle via SSH (en ligne de commande uniquement)^{ix}

1) Activer SSH avant le démarrage

- Insérez la carte microSD dans l'ordinateur
- Ouvrez la partition boot
- Créez un fichier vide nommé ssh (sans extension)

2) Configurer le Wi-Fi (optionnel si vous n'utilisez pas de câble Ethernet)

Dans la même partition boot, créez un fichier nommé wpa_supplicant.conf avec le contenu suivant

```
country=FR
ctrl_interface=DIR=/var/run/
wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1
network={ssid="Nom_de_votre_wifi"
        Psk="Mot_de_passe" }
```

3) Démarrer le Raspberry Pi

Insérez la carte dans le Raspberry Pi et branchez l'alimentation.

4) Trouver l'adresse IP du Raspberry Pi

Via les paramètres de votre routeur ou une application comme Fing.

5) Télécharger et installer PuTTY

Téléchargez et installez PuTTY depuis le site officiel [PuTTY Download](#).

6) Se connecter à Raspberry Pi via SSH en utilisant PuTTY

- Ouvrez PuTTY
- Entrez l'adresse IP de Raspberry Pi dans la case Host Name (or IP address)
- Sélectionnez SSH comme type de connexion
- Cliquez sur Open
- Lors de la demande de mot de passe, entrez Raspberry (le mot de passe par défaut).

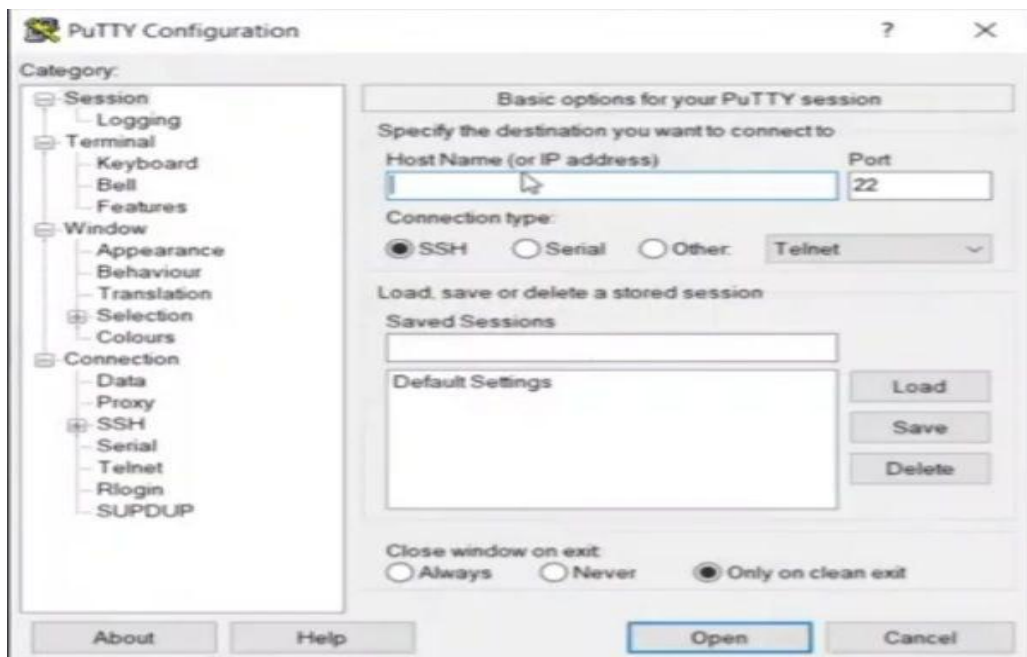


Figure II. 10 .Configuration d'une session SSH avec PuTTY

Résultat Vous pouvez contrôler Raspberry Pi à distance via des commandes uniquement en utilisant PuTTY sur votre PC.

II. 3.4.2.2 Contrôle via VNC (interface graphique)*

- 1) Se connecter d'abord via SSH (comme expliqué dans la méthode 1)
- 2) Ouvrir les paramètres du Raspberry Pi
 - Tapez la commande `sudo raspi-config`
 - Choisissez (Advanced Options) parmi les options affichées.
 - Accédez à l'option SSH, cliquez sur "Enable", puis sur "Finish", ensuite sélectionnez "OK".

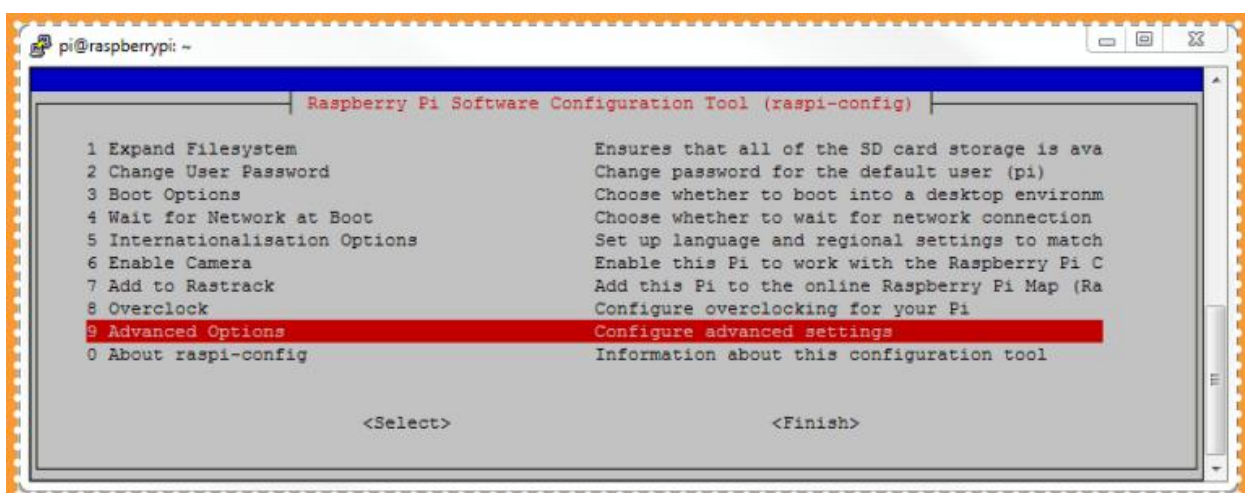


Figure II. 11. Accès aux options avancées

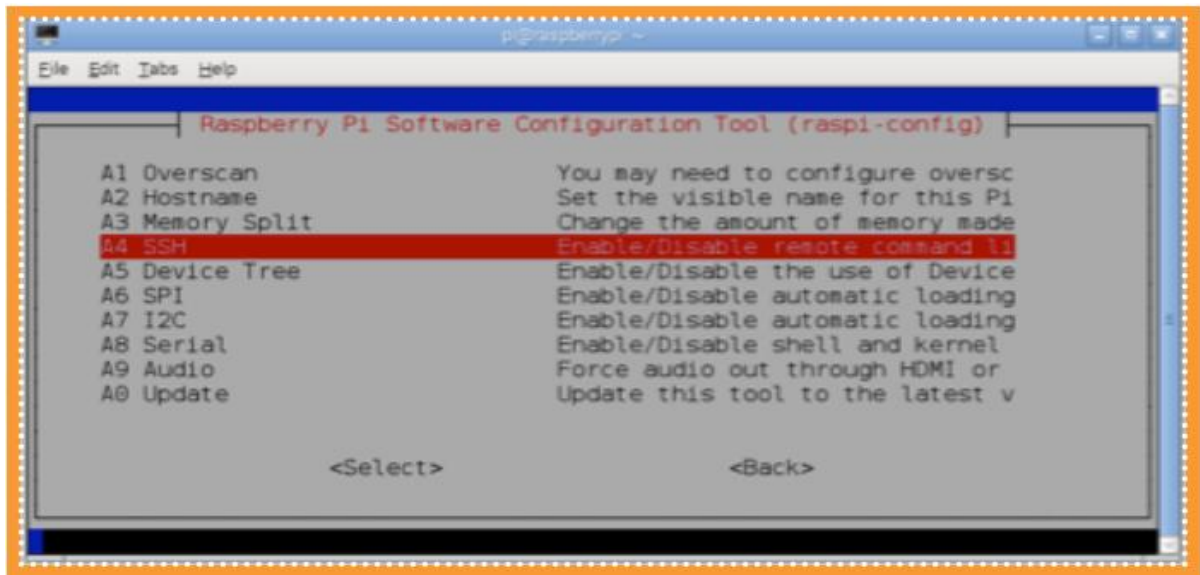


Figure II.12.Activation de SSH



Figure II.13. Confirmation de la configuration SSH

3) Activer le service VNC

Sélectionnez Interface Options → VNC → Yes

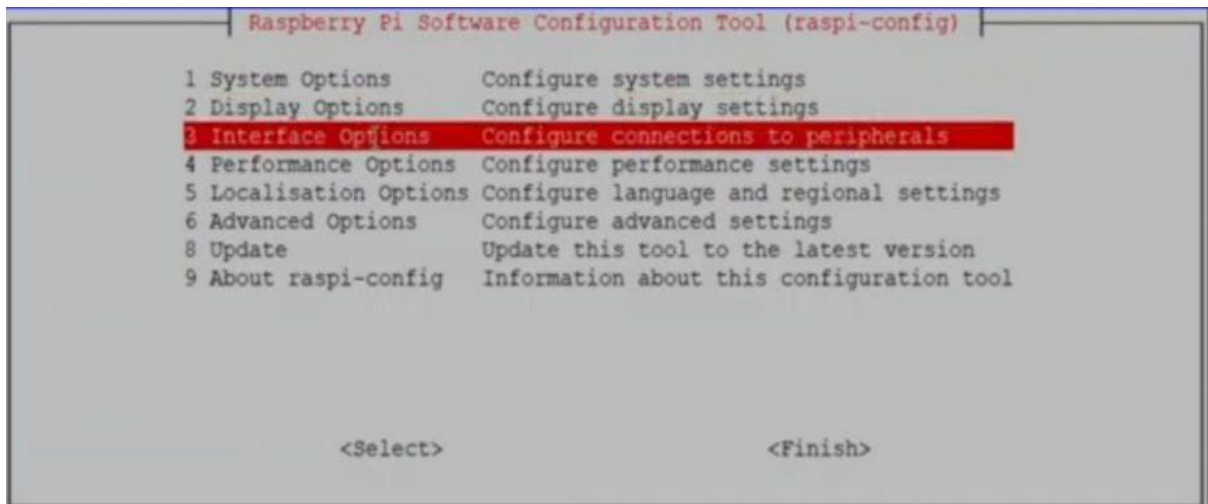


Figure II. 14. Accès aux options d'interface

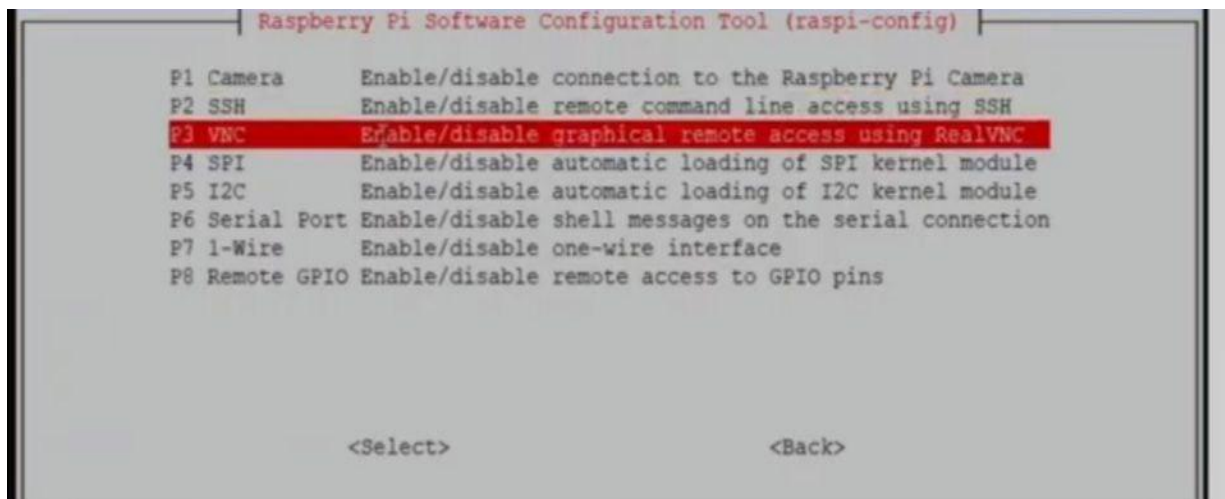


Figure II.15. Activation du service VNC

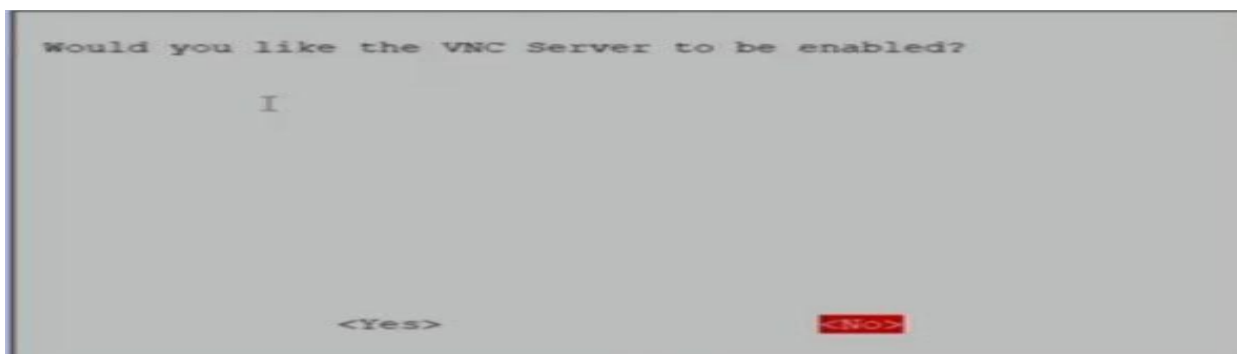


Figure II.16. Confirmation de l'activation du service VNC

4) Installer VNC Viewer sur le PC

Téléchargez le logiciel RealVNC Viewer depuis le site officiel.

5) Se connecter à l'interface graphique

- Ouvrez VNC Viewer et entrez l'adresse IP du Raspberry Pi.
- Utilisez l'identifiant `pi`, et le mot de passe `Raspberry` (ou le mot de passe que vous avez défini). (Figure II. 17)

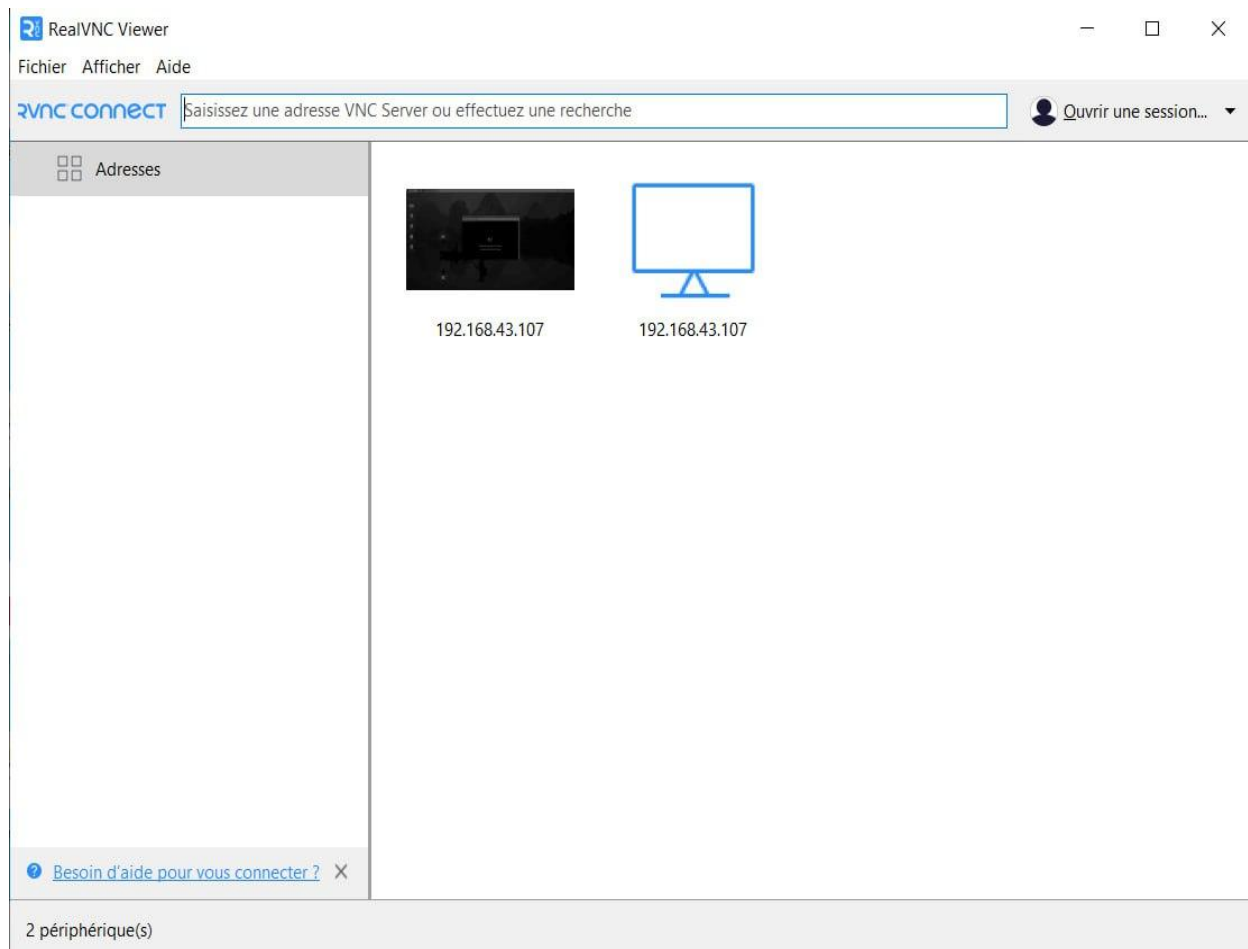


Figure II. 17. Interface RealVNC pour se connecter à Raspberry Pi

Résultat. Vous verrez le bureau du Raspberry Pi sur votre PC, et vous pourrez le contrôler comme si vous étiez devant lui.

Remarque Dans ces étapes, on utilise un ordinateur fonctionnant sous Windows pour réaliser la configuration et la connexion au Raspberry Pi.

Conclusion

Grâce à cette explication, nous avons appris la carte Raspberry Pi 5, en l'une des meilleures options du monde informatique miniature, grâce à son puissance, sa flexibilité et son maniement aisé. Nous avons aussi passé en revue les différentes étapes d'installation de son système d'exploitation et de sa mise en marche, que ce soit à contrôle direct sur un écran ou en distance avec les protocoles SSH et VNC.

Cette carte nous donne un environnement parfait pour apprendre à programmer, créer des projets électroniques et des applications IoT (Internet des Objets) avec la plus grande facilité. Grâce aux étapes que nous avons mis en pratique, l'utilisateur peut désormais passer de l'étape d'installation à l'utilisation effective de la carte, que ce soit par les commandes ou l'interface graphique, ouvrant ainsi la porte à de multiples applications et innovations.

CHAPITRE III

Expérimentations et mise en œuvre pratique



III.1 Installation du dispositif et test des transmetteurs

À ce stade, le dispositif électronique a été mis en œuvre à l'aide du Raspberry Pi 5 pour la détection de fuite d'eau en mesurant la pression dans le réseau. Il se compose de

- Raspberry Pi 5 unité de contrôle principale.
- ADS1115 convertisseur des signaux analogiques sortis des transmetteurs en données numériques.
- Deux transmetteurs de pression pour mesurer la pression à deux points différents dans un conduit.
- Électrovanne pour représenter une fuite d'eau à faire de manière contrôlée.

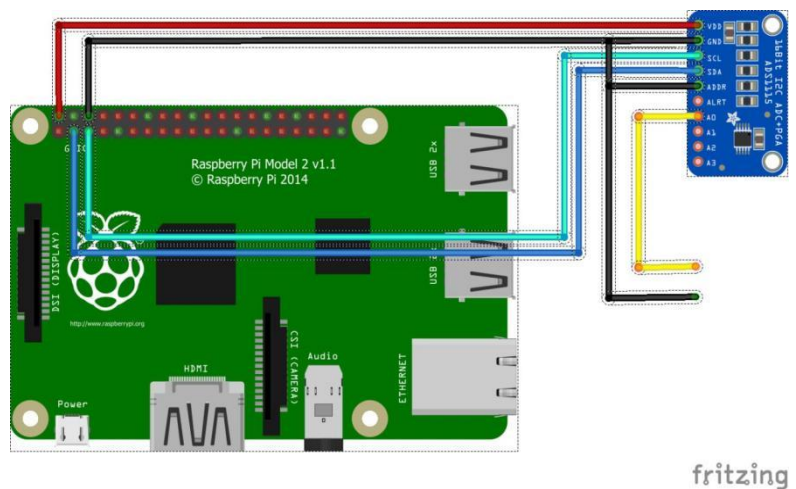


Figure
III.1. Connexion du Raspberry Pi avec ADS1115

Figure III.2. transmetteurs de pression

III.1.1 Montage électrique

Les connexions ont été établies comme suit

ADS1115 ↔ Raspberry Pi par le bus I2C

- VCC → 3.3V
- GND → GND

- SDA → GPIO 2
- SCL → GPIO 3

Premier transmetteur connecté à AIN0.

Deuxième transmetteur connecté à AIN1 (utilisé uniquement lors des expériences de fuite).

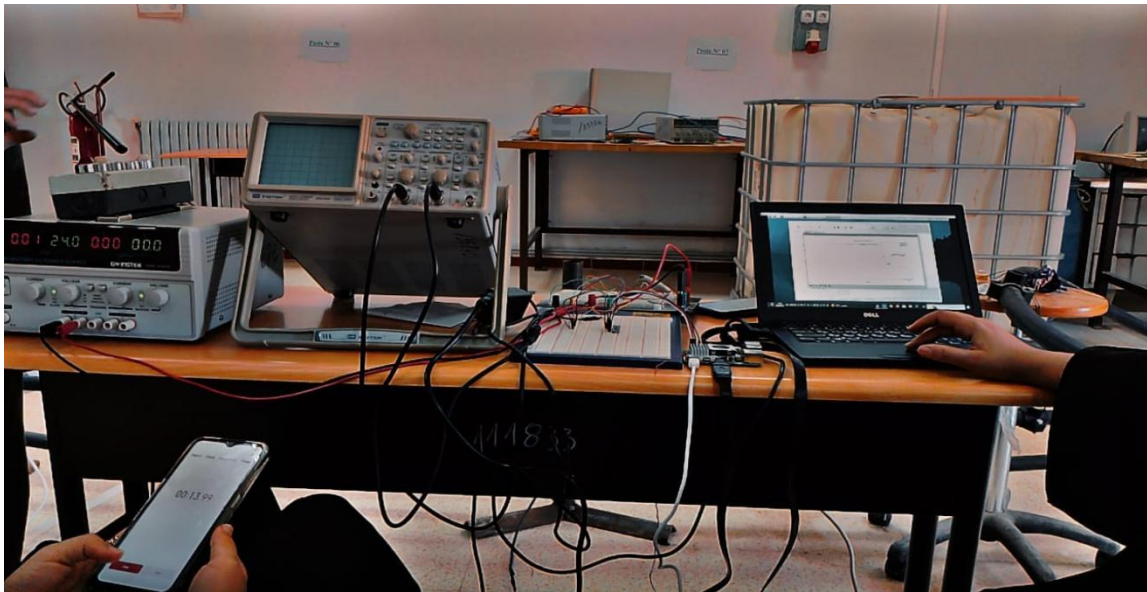


Figure III.3. Montage électrique

III.1.2 Acquisition de données et méthodologie de mesure

Pour une détection efficace des fuites d'eau, nous avons entamé un processus Procédure et systématisation. De la phase d'étude préalable dans cette séquence, il y a le recueil de l'information et des données avec toutes les traits et détails de l'effort comme suit au de traitement subséquent. À cet égard, un système a été construit au niveau de prises de mesure avec le Raspberry Pi 5, deux transmetteurs de pression, et le convertisseur courant-tension.

Les expériences ont été réalisées en deux phases

1. Phase d'étalonnage (sans fuite)

Un seul capteur de pression a été utilisé.

Il a été déplacé progressivement à différentes distances le long de la conduite.

Son but était de surveiller la stabilité de la pression et d'étudier l'incidence de sa position sur

Les valeurs relevées en l'absence de fuite d'eau.

2. Phase de détection de fuite

Un capteur a été installé dans un environnement stable le capteur 1, est resté près de la source d'eau pour surveiller la pression de façon continue.

Le capteur 2 a été déplacé progressivement le long de la conduite.

Après avoir déclenché une fuite contrôlée par le biais de l'électrovanne, il a été procédé à des mesures pour les deux transmetteurs, à chaque position.

Cette approche a permis d'avoir une observation précise de l'évolution de la pression en approchant le capteur mobile du point de fuite, et d'analyser un réseau d'environ 100 mètres.

Acquisition de données

Les transmetteurs ont été lus avec ADS1115 et leurs valeurs enregistrées automatiquement au moyen d'un script Python.

Les fichiers de travail .csv ou .xlsx contiennent maintenant les données de pression et magistralement l'ensemble des données expérimentales pour l'entraînement du modèle d'intelligence artificielle.

Cette automatisation a permis de confiance à la capture, l'enregistrement et la disponibilité systématique des informations nécessaires pour la détection intelligente de fuites.

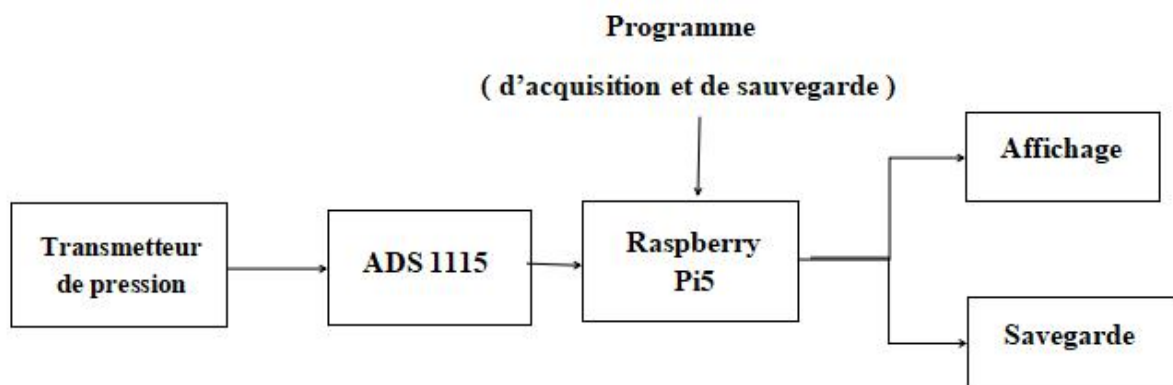


Figure III.4.Acquisition des données.

III.1.3 Environnement logiciel

Le langage de programmation de l'implémentation est le langage Python3 sous l'OS Raspberry Pi OS. Les bibliothèques installées sont

- Adafruit_ADS1x15 permet de lire les informations fournies par les transmetteurs de pression et par le convertisseur ADS1115.
- Adafruit-Blinka est une couche d'abstraction qui permet l'utilisation des bibliothèques Circuit Python sur un Raspberry Pi.
- pandas pour organiser, analyser et exporter les données sous forme de fichiers Excel.
- datetime et time pour gérer les timings des mesures et pour enregistrer les horodatages.
- matplotlib pour prévoir des courbes illustratives des résultats.
- scikit-learn pour entraîner le modèle intelligent et pour analyser les données.
- joblib pour sauvegarder et charger le modèle entraîné lors du phase du traitement de détection.
- tensorflow pour exploiter des modèles d'apprentissage profond (deep learning) dans la phase de détection.
- lgpio est une bibliothèque permettant de contrôler les broches GPIO du Raspberry Pi 5 de manière fiable.

L'environnement logiciel fait preuve d'une grande souplesse et d'une grande puissance permettant une collecte de données optimale, leur analyse, leur représentation graphique et l'application d'un modèle de Machine Learning permettant de détecter les fuites automatiquement.

III.1.4 Intégration de l'intelligence artificielle

Au cours de cette phase pratique de projet, l'ensemble a été mis en œuvre pour réaliser la détection automatique de fuites en temps réel. La première étape consiste à réaliser

l'initialisation de l'I2C et de l'ADC (ADS1115) connecté au capteur de pression, dont on acquiert des valeurs de pression selon une fréquence d'échantillonnage adéquate.

Ces valeurs de pression sont envoyées vers un modèle BiGRU pré-entraîné puis sauvegardé au format .h5, ce modèle est déchargé lors de l'initialisation du système. Ce dernier permet en permanence pour chaque séquence de décider la classe associée à l'état "y a-t-il une fuite ?" Oui ou Non.

Les résultats sont stockés dans une base de données, illustrée par le schéma ci-après correspondant à la séquence des étapes :

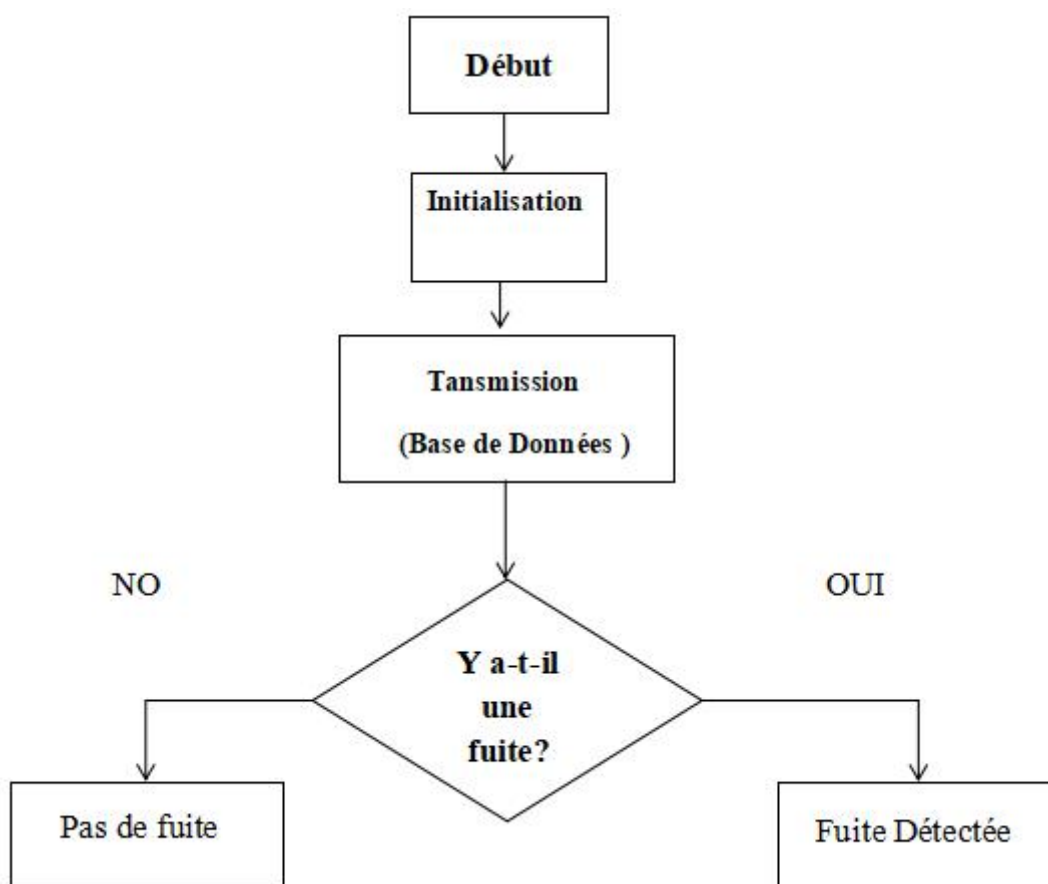


Figure III.5. Détection par AI

III.2 Obtention de données et analyse des données

Nous avons alors plus précisément collecté des données de pression issues des lectures réalisées au sein d'un réseau constitué d'une conduite de 100 mètres de long, dont nous avons

cherché à apprécier les effets des fuites sur la pression à différents points du réseau. Nous avons organisé notre travail autour des étapes suivantes

III.2.1 Fixation des expériences

Le réseau a été impliqué en différents points stratégiques afin de fixer ou de déplacer manuellement les transmetteurs.

Nous avons ainsi utilisé

- Un transmetteur fixe près de la source d'eau (soit au début de la conduite).
- Un transmetteur mobile « lent » déployé le long de la conduite à différents points (tous les 10 ou 20 mètres par exemple).
- L'électrovanne a été contrôlée pour générer une fuite maîtrisée avec le même débit et la même pression à chaque expérience.

III.2.2 Méthode d'enregistrement

À chaque point, nous avons enregistré simultanément la pression avec les deux transmetteurs pendant une durée limitée (i.e. 5 minutes par point).

Les enregistrements ont permis de stocker et traquer les données

- Pression1 (V) transmetteur fixe.
- Pression2 (V) transmetteur mobile.
- Temps pour garantir la stabilité des valeurs.

Les résultats ont été exportés vers des fichiers Excel à partir d'un code Python rédigé pour collecter automatiquement les données toutes les secondes.

III.2.3 Données mesurées

Nous avons procédé à deux expérimentations majeures

- Une en l'absence de fuite pour établir la courbe de pression normale dans le réseau

- une en présence de fuite pour suivre l'évolution de la pression lorsque nous avons provoqué une fuite.
- Les images ci-joints témoignent de la stabilité des valeurs mesurées en l'absence de fuite d'eau, révélant à l'inverse des variations nettes en cas de fuite, et plus particulièrement lorsque le capteur mobile se rapprochait du point de fuite.

III.2.4. Analyse des signaux de pression

- Sans fuite

Un réseau qui ne fuit peut être considéré comme parfaitement bien mesuré, étant donné qu'aucun des deux transmetteurs ne montre la moindre variation de pression, ce qui était bien le cas expérimentalement avec une pression stable mesurée tout le long du réseau, avec des variations très modestes et normales dans les valeurs mesurées.

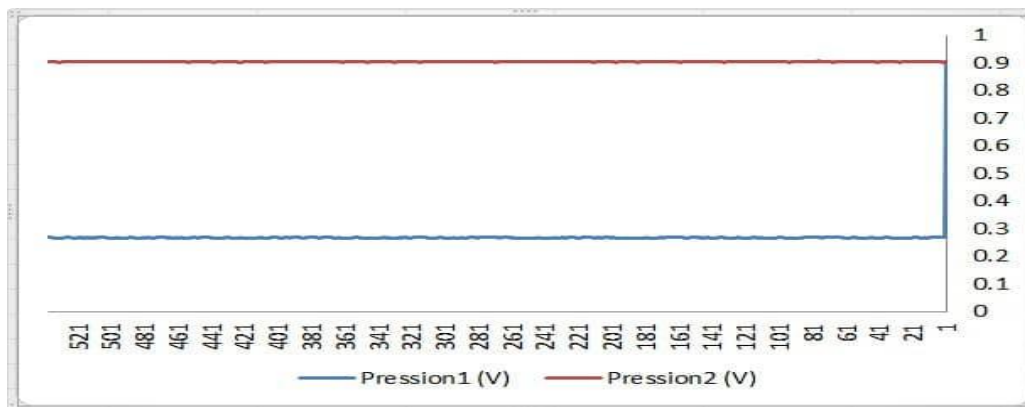


Figure III.6. Signale sans fuite

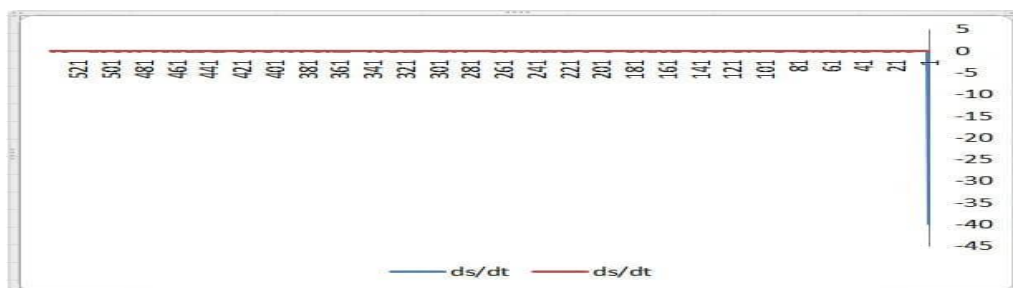


Figure III.7 Signal dérivé sans fuite.

- Avec fuite

Le graphe des pressions développées en fonction du temps lors de la deuxième image fournie, indique une baisse des pressions mesurées au moment précis où l'électrovanne a été ouverte (début de la fuite d'eau). Comme le montre l'illustration de la transférabilité plutôt bonne des données, les courbes mesurées (bleue et rouge) s'indiquent dans un premier temps de façon synchrone, toutes deux chute ensemble, indiquant que seule la pression globale du réseau a été affectée par la fuite, et donc que le capteur de pression fixe en position constante a bien enregistré une évolution de plus de 25% correspond aux autres échelles du capteur mobile.

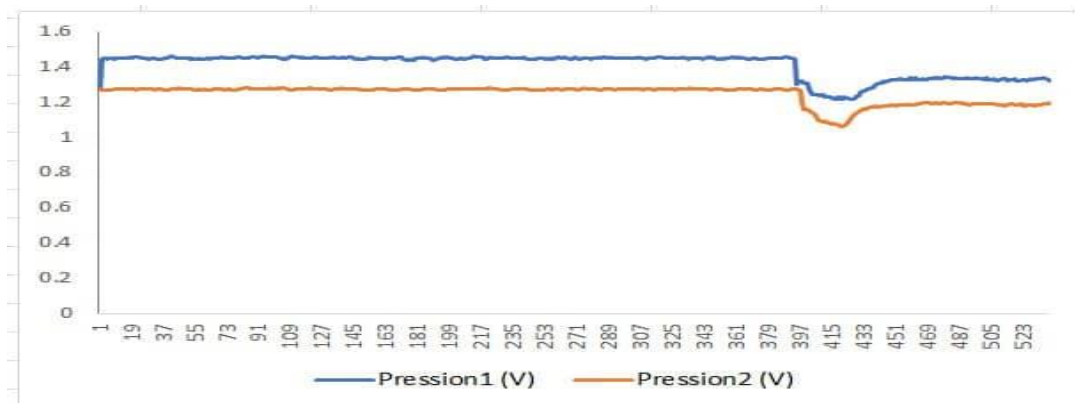


Figure III.8. Signale avec une fuite

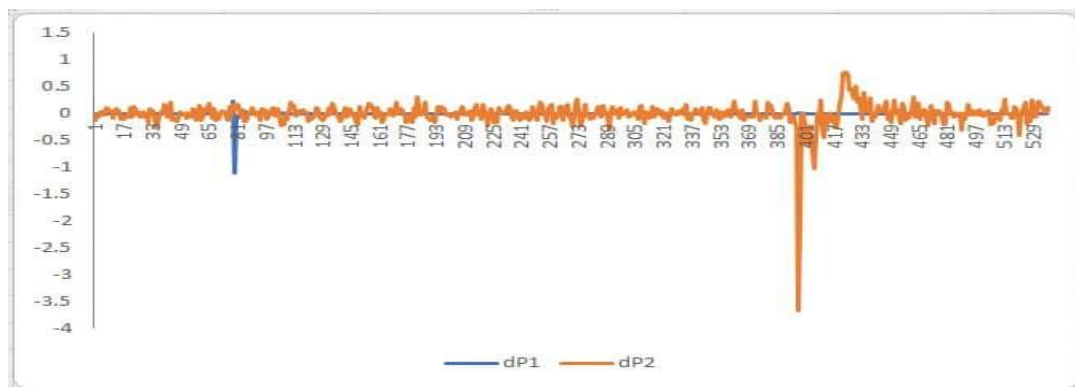


Figure III.9. Signal dérivé avec fuite

III.2.5. Application d'un modèle BiGRU pour la détection temporelle des fuites

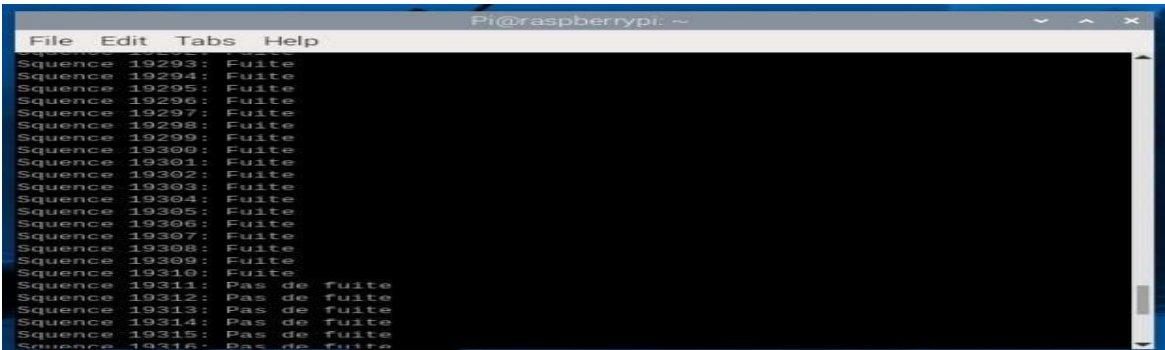
À cette étape de notre développement, nous avons conçu un système de détection de fuites d'eau en utilisant un modèle de réseau de neurones récurrent appelé BiGRU, qui est très performant pour analyser les données des transmetteurs sur une période temporelle. Ce modèle a la particularité de traiter les données dans les deux sens, passé et futur, ce qui lui permet de mieux comprendre l'évolution du signal et de détecter les fuites avec plus de précision que les modèles traditionnels.

Nous avons commencé par initialiser la communication avec le convertisseur analogique-numérique ADS1115 pour lire la tension provenant du capteur connecté au canal A0, puis chargé un modèle BiGRU. Préalablement entraîné en utilisant les bibliothèques Tensorflow et Keras.

Le système effectue une lecture continue à une fréquence de 100 Hz, en collectant les valeurs de pression par groupes de 50 échantillons. Une fois le groupe complet, il est converti en une matrice tridimensionnelle qui sert d'entrée au modèle.

Le modèle fournit une probabilité de présence de fuite. Si cette probabilité dépasse 0,7, le système affiche « Fuite », sinon il affiche « Pas de fuite ». Ces informations sont affichées en temps réel avec la valeur de tension mesurée.

Ainsi, ce système permet une détection fiable et automatique des fuites, sans nécessiter d'analyse manuelle, ce qui améliore l'efficacité globale.



```
File Edit Tabs Help
Sequence 19293: Fuite
Sequence 19294: Fuite
Sequence 19295: Fuite
Sequence 19296: Fuite
Sequence 19297: Fuite
Sequence 19298: Fuite
Sequence 19299: Fuite
Sequence 19300: Fuite
Sequence 19301: Fuite
Sequence 19302: Fuite
Sequence 19303: Fuite
Sequence 19304: Fuite
Sequence 19305: Fuite
Sequence 19306: Fuite
Sequence 19307: Fuite
Sequence 19308: Fuite
Sequence 19309: Fuite
Sequence 19310: Fuite
Sequence 19311: Pas de fuite
Sequence 19312: Pas de fuite
Sequence 19313: Pas de fuite
Sequence 19314: Pas de fuite
Sequence 19315: Pas de fuite
Sequence 19316: Pas de fuite
```

Figure III.10 Résultat de la classification automatique par le modèle d'IA

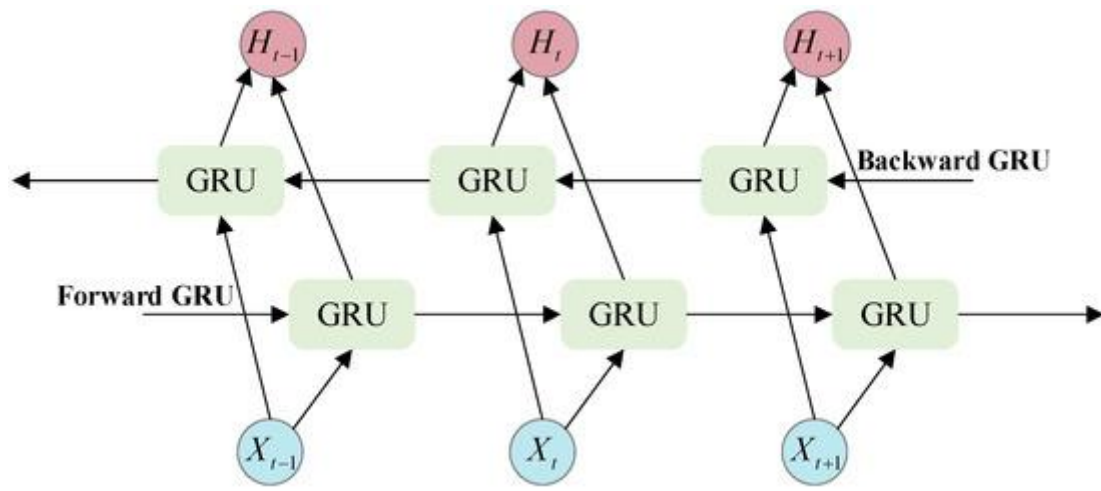


Figure III.11. Schématisation diagramme of the Bi-GRU model.

III.3. Difficultés rencontrées et solutions adoptées tout au long du projet

Premièrement, durant toute la période de l'occurrence où s'est produite l'exécution du projet, il est survenu des innombrables problèmes à caractère technique et pratique appelant à être corrigés des arrangements afin de favoriser le bon développement des expériences ainsi que la confiance dans les résultats. Voici ci-dessous un récapitulatif des principaux problèmes et des solutions adoptées

1. Stabilité de la communication entre le Raspberry Pi et l'ADS1115

Problème

- Il est survenu de manière occasionnelle que la communication par I2C du Raspberry Pi vers l'ADS1115 soit perdue ou qu'elle ne fournisse pas de bonnes lectures, du fait d'interférences électriques ou de câbles trop longs.

Solution

- Utilisation de câbles de bonne qualité et de courte longueur pour le raccordement permettant de réduire le bruit.
- Contrôle de la présence de résistances de tirage (Pull-up) sur les lignes SDA et SCL conformément aux spécifications.

- Redémarrage automatique du service i2c par code en cas d'erreur détectée.

2. Pression variation due à des facteurs externes

Challenge Au cours des essais, nous avons fréquemment observé des variations infimes dans les pression lectures même en l'absence de fuite, ce qui rendait difficile la discrimination entre bruit normal et fuite vraie.

Solution

- Répéter les enregistrements à des moments différents pour fixer les moyennes.
- Utiliser des méthodes statistiques pour intégrer les valeurs extrêmes.
- Intégrer l'intelligence artificielle pour améliorer la précision de détection et réduire les faux positifs.

3. Simulation précise et réaliste des fuites

Défi

Il n'était pas toujours simple de contrôler précisément la taille et la durée de la fuite simulée avec l'électrovanne pour reproduire des cas réalistes.

Solution

Utilisation d'une électrovanne de haute précision avec commande électronique pour ajuster l'ouverture.

Répéter plusieurs fois les tests pour garantir la cohérence des résultats.

4. Gestion des grandes quantités de données

Défi

Chaque expérience générait un grand volume de données, ce qui compliquait leur gestion et analyse manuelle.

Solution

- Utilisation de la bibliothèque pandas pour traiter facilement les données.

- Automatisation de l'exportation et du nommage des fichiers pour éviter les erreurs manuelles.
- Exploitation de graphiques pour interpréter rapidement les résultats.

5. Entraînement du modèle d'intelligence artificielle

Défi

"Il était nécessaire d'obtenir des données équilibrées (cas avec et sans fuite) afin d'entraîner un modèle efficace."

Solution

- Récupérer les expériences pour varier les données.
- Utiliser des méthodes d'augmentation des données en fonction de besoins pour compléter la base d'apprentissage.

6. Casse d'un clapet au cours des essais

Défi

Durant l'une des expériences, l'un des clapets de les canalisations s'est cassé par suite d'une très forte pression, ce qui a immédiatement interrompu la production.

Solution

- Instantané remplacement du clapet endommagé par un plus fort.
- Visages des pressions maximums acceptables en vue de mettre un terme aux récurrences du défaut.



Figure III.12. Casse d'un clapet au cours des essais

III.4 Résultats obtenue et discussion

À l'issue de l'ensemble des expériences exécutées en conformité à la méthodologie mise en œuvre, un lot de résultats a été constitué permettant l'évaluation de l'efficacité du dispositif dans la détection des fuites d'eau. Ces résultats peuvent être résumés et discutés comme suit

1. Précision des mesures

Les enregistrements des données obtenues par les transmetteurs de pression ont permis de constater une stabilité des valeurs sans fuite relativement ferme avec un léger jeu dû à des facteurs d'ordre naturel tel la distance ou la hauteur de la conduite. Lors de la fuite, une nette décroissance de la pression observée, plus particulièrement lors du rapprochement du capteur mobile du point de fuite, a ainsi bien confirmé la sensibilité du système face aux variations créées par la fuite.

2. Efficacité de l'utilisation de deux transmetteurs

Il a été démontré que le système mis en œuvre par l'utilisation, d'un côté, d'un capteur fixe, et d'un autre côté, d'un mobile à la suite d'une détection de fuite fait que l'image fournie concernant la distribution de pression tout long de la conduite est plus satisfaisante. Les résultats de l'expérience mettent en avant que la présence de deux transmetteurs permette la

vérification croisée des données et améliore la précision de détermination de localisation de la fuite pour un réseau de 100m de long, pour lequel les caractéristiques de pression varient tout au long de sa longueur.

3. Performance de l'intelligence artificielle

Fondement du savoir de modèle intelligent a été composé avec des données composées par fuite or no fuite instances. Nous ont trouvé le test sur nouvelle donnée intéressant en constatant que le modèle était capable de séparer les deux situations. Le modèle a validement, donc, identifié correctement les fuites et a été possible d'optimiser le taux d'efficacité du système en effaçant les erreurs de détection.

4. Importance des graphiques

Les graphiques préparés ont aidé à illustrer comment la pression varie au fil du temps et à différents emplacements. Ces graphiques ont constitué un outil visuel important pour comprendre rapidement les performances du système et analyser les résultats plus facilement.

III.5 Discussion générale

Les résultats montrent que le système développé avec le Raspberry Pi, les transmetteurs de pression et le convertisseur ADS1115 peut détecter efficacement les fuites dans les réseaux de distribution d'eau de petite et moyenne taille. Malgré quelques difficultés techniques, l'expérience a démontré que la méthodologie utilisant deux transmetteurs et l'intelligence artificielle pour analyser les données apporte une valeur ajoutée significative au système et constitue une solution prometteuse pour des applications réelles.

Conclusion générale

Conclusion générale

À travers ce travail, nous avons essayé de traiter une problématique réelle qui touche les réseaux de distribution d'eau, à savoir les fuites qui causent une perte considérable de cette ressource précieuse. L'objectif de notre étude était de proposer une solution technique permettant de détecter ces fuites de manière précoce, en utilisant des moyens électroniques modernes.

Dans la première partie, nous avons défini les réseaux de distribution d'eau, expliqué les types de fuites ainsi que leurs causes, et présenté leurs impacts négatifs, que ce soit sur le plan économique ou environnemental. Ensuite, nous avons abordé les méthodes traditionnelles de détection, tout en mettant en évidence leurs limites.

Par la suite, nous avons présenté les composants utilisés dans notre projet, notamment le microcontrôleur Raspberry Pi, le convertisseur ADS1115, ainsi que les transmetteurs choisis pour la collecte des données. Ces équipements ont été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques et de leur rôle dans la surveillance du réseau.

Dans la partie pratique, nous avons installé le système et testé les transmetteurs, puis nous avons collecté les données afin de les analyser. Certaines difficultés ont été rencontrées, mais nous avons pu les surmonter grâce à des solutions adaptées. Les résultats obtenus sont encourageants et montrent que ce système peut être utilisé pour détecter les fuites.

En résumé, ce travail constitue une première étape dans l'utilisation d'outils numériques intelligents pour améliorer la surveillance des réseaux d'eau. Pour l'avenir, nous suggérons de développer davantage le système, en intégrant des algorithmes d'analyse plus avancés, ou en l'appliquant à des réseaux réels de plus grande échelle.

Liste des références

Liste des références

- [1] Kaakemi El-Hassani, A. N. (2020). Étude des fuites dans les réseaux d'alimentation en eau potable [Mémoire de master, Université d'Alger]
- [2] Daoud, A. (s.d.). Chapitre 5 Réseaux de distribution de l'eau. Université de Batna 2.
- [3] M. Ostadalamani, M. Ameri, and M. Sadeghian, "Water leakage management in urban water distribution networks Classification and detection methods," *Journal of Water Supply Research and Technology—AQUA*, vol. 66, no. 3, pp. 202–213, 2017, doi 10.2166/aqua.2017.088.
- [4] APS, "ADE plus de 350.000 fuites d'eau réparées en 2022", 16-02-2023. [Accessed Jun. 2, 2025]. Available <https://www.aps.dz/economie/157644-ade-plus-de-350-000-fuites-d-eau-reparees-en-2022>
- [5] Veolia, "Rechercher les fuites d'eau pour réduire les pertes d'eau," Veolia, [En ligne]. Disponible sur <https://www.veolia.com/fr/planetlive/detecter-fuites-deau-reduire-pertes-eau-potable>. [Consulté le 2 juin 2025].
- [6] E. Farah and I. Shehro, "Water Leak Detection A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions," **Water**, vol. 16, no. 20, pp. 1-30, 2024.
- [7] M. Cholewa, M. Szymkowiak, P. Gładysz, A. Sikora, and J. Gajowniczek, "Just One More Sensor is Enough – Iterative Water Leak Localization with Physical Simulation and a Small Number of Pressure Sensors," arXiv preprint arXiv:2406.19900, Jun. 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2406.19900>

ⁱ A. A. Abdallah, *Maîtriser le Raspberry Pi*, Édition Creative Commons BY-NC-SA 4.0, 2014.

ⁱⁱ S. Monk, *Programming the Raspberry Pi: Getting Started with Python*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2016.

ⁱⁱⁱ E. Upton and G. Halfacree, *Raspberry Pi User Guide*, 3rd ed. Chichester, UK: Wiley, 2014.

^{iv} Livre Abdallah, A. A. (2014). *Maîtriser le Raspberry Pi*. Licence Creative Commons (BY-NC-SA 4.0).

^v M. Richardson and S. Wallace, *Getting Started with Raspberry Pi*, 3rd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media,

^{vi} A. C. Fletcher and C. Mura, "Ten Quick Tips for Using a Raspberry Pi," arXiv, Sep. 28, 2018

- ^{vii} J. C. Howell et al., “Raspberry Pi multispectral imaging camera system (PiMICS): a low-cost, skills-based physics educational tool,” arXiv, Dec. 6, 2024.
- ^{viii} A. M. Barbancho, L. J. Tardon, and I. Barbancho, “Building music with Lego bricks and Raspberry Pi,” arXiv, Nov. 20, 2024.
- ^{ix} V. A. Cicirello, “Design, Configuration, Implementation, and Performance of a Simple 32 Core Raspberry Pi Cluster,” arXiv, Aug. 17, 2017
- ^xRaspberry Pi Foundation. (s.d.). Accès à distance – Utilisation de VNC. Documentation Raspberry Pi. Consulté le 19 mars 2025, à l’adresse <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/remote-access.html#using-vnc>