

Conception et Déploiement d'un Robot Pompier Intelligent Basé sur l'IoT et le Logiciel LabVIEW

Design and Implementation of an Intelligent IoT-Based Firefighting Robot with Real-Time Supervision Using ESP32 and LabVIEW

Marwen Fassatoui^{#1}, Amira Rzig^{#2}

^{#1}Direction Générale des Etudes Technologiques, Institut supérieur des études technologiques de Radès.

^{#2}Rue de Jérusalem 2098 Radès Médina – Ben Arous (Tunisie)

¹marouan.fassatoui@gmail.com

²rzigamira@gmail.com

Résumé—

Cet article présente la conception, la réalisation et la mise en œuvre d'un robot pompier intelligent basé sur les technologies de l'Internet des Objets (IoT), les systèmes embarqués et la supervision en temps réel sous LabVIEW. Le système proposé repose sur un microcontrôleur ESP32 qui assure l'acquisition des données issues des capteurs infrarouges dédiés à la détection des flammes, le pilotage des moteurs à courant continu pour la navigation autonome, ainsi que le contrôle d'un système d'extinction électromécanique constitué d'un servomoteur et d'une pompe à eau.

Une architecture de communication orientée cloud, basée sur la plateforme Firebase, permet l'échange et l'enregistrement des données en temps réel, assurant ainsi le suivi à distance de l'état du robot, des événements de détection et des phases d'intervention. L'interface graphique développée sous LabVIEW offre une supervision complète du système, avec un affichage instantané des mesures des capteurs, la visualisation de l'état de fonctionnement, ainsi que des modes de commande manuelle et automatique.

Les résultats expérimentaux ont permis de valider la capacité du robot à détecter rapidement une source de flamme, à s'orienter automatiquement vers celle-ci et à déclencher efficacement le processus d'extinction. L'architecture proposée se distingue par son faible coût, sa modularité et sa facilité d'évolution, ce qui la rend adaptée à des applications de lutte contre les incendies en milieux confinés ou à risques. Des perspectives d'amélioration sont envisagées, notamment l'intégration de capteurs avancés, de techniques de vision par ordinateur et d'algorithmes d'intelligence artificielle, afin d'accroître l'autonomie, la précision de détection et la robustesse globale du système.

Mots clés— Robot pompier, IoT, Supervision, LabVIEW, Node-RED, MQTT, Firebase, NX Siemens

Abstract—

This paper presents the design, development, and experimental validation of an intelligent firefighting robotic system based on Internet of Things (IoT) technologies and real-time supervision. The proposed system is built around an ESP32 microcontroller used for sensor data acquisition, motor control, and wireless communication. Infrared flame sensors are employed for early fire detection, while DC motors and a servo-controlled water pump ensure autonomous navigation and fire extinguishing.

A cloud-based communication infrastructure using Firebase enables real-time data transmission, event logging, and remote monitoring. A graphical supervision interface developed using LabVIEW allows real-time visualization of sensor measurements, system states, and both manual and automatic control modes.

Experimental results demonstrate that the robot efficiently detects flames, accurately localizes the fire source, and successfully performs automatic extinguishing operations. The proposed solution offers a low-cost, modular, and scalable platform suitable for smart firefighting applications. Future enhancements may include advanced navigation algorithms, artificial intelligence techniques, and the integration of additional perception sensors to improve autonomy and reliability in complex environments.

Keywords— Firefighting Robot, IoT, Real-time Supervision, LabVIEW, Node-RED, MQTT, Firebase, NX Siemens

I. INTRODUCTION

Les avancées en robotique, en intelligence artificielle et dans les technologies embarquées ne cessent d'être un besoin imminent pour les modalités d'intervention dans les environnements complexes.

Depuis les premiers robots télécommandés utilisés dans les années 1970-1980 pour des missions militaires ou industrielles [1], jusqu'aux systèmes intelligents actuels, les objectifs recherchés visent toujours l'autonomie, la miniaturisation et l'interconnectivité.

L'essor de l'Internet des Objets (IoT) a particulièrement stimulé la création de robots intelligents qui peuvent agir dans des zones à risque, comme les incendies.

Plusieurs recherches récentes ont ainsi mis en évidence le potentiel de l'IoT pour la détection, la surveillance et la prise de décision autonome dans des scénarios de secours [2][3]. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent article qui propose la conception et la mise en œuvre d'un robot pompier intelligent fondé sur une architecture embarquée ESP32, intégrant des capteurs IR, une pompe à eau, une interface LabVIEW, et un échange de données via Firebase.

L'objectif est de créer un prototype autonome et connecté, capable de détecter une flamme, de se positionner automatiquement juste en face d'elle et de procéder à son extinction tout en communiquant les données en temps réel à un poste de supervision.

L'évolution rapide des architectures matérielles embarquées et des protocoles de communication sans fil a rendu possible l'intégration de systèmes robotiques de plus en plus performants dans des contextes de secours. Dans ce cadre, l'utilisation de l'ESP32 comme cœur du système constitue un choix pertinent, car il combine des capacités de calcul adaptées au traitement en temps réel avec une double connectivité Wi-Fi et Bluetooth, permettant une interaction fluide avec l'environnement numérique. Les capteurs infrarouges assurent une détection rapide et efficace des sources de chaleur, tandis que la pompe à eau intégrée matérialise la fonction d'extinction. L'interface graphique développée sous LabVIEW offre une plateforme de supervision flexible et modulaire, facilitant à la fois le monitoring, le diagnostic et l'interaction avec le robot. Enfin, le recours à Firebase comme solution de communication cloud assure une transmission fiable et centralisée des données, ce qui permet d'élargir l'application envisagée vers une gestion collaborative multi-robots ou un déploiement dans un réseau IoT urbain de type « smart city ».

Ces choix technologiques s'inscrivent dans une logique de prototypage évolutif, pouvant être enrichi par des algorithmes de navigation avancés, l'intégration de capteurs complémentaires (caméra thermique, lidar, GPS) ou encore l'adoption de modèles d'intelligence artificielle pour améliorer la prise de décision autonome et la robustesse de l'intervention.

II. ARCHITECTURE ET METHODOLOGIE

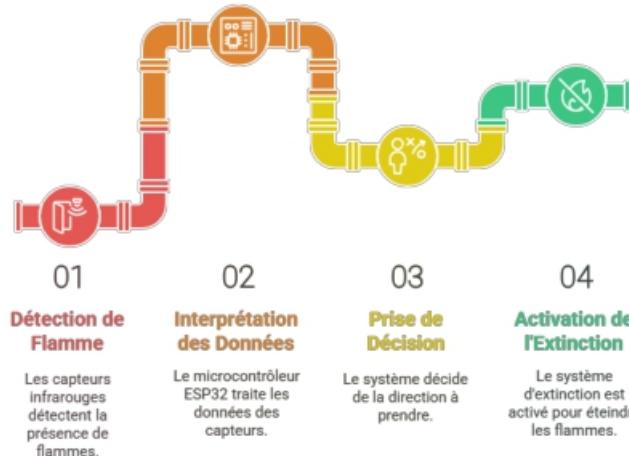
Le robot pompier développé repose sur une architecture fonctionnelle structurée autour d'une **séquence opérationnelle en quatre phases**, assurant la détection, la localisation, l'approche et l'extinction d'un foyer d'incendie. Cette organisation permet d'optimiser la réactivité du système, la précision de l'intervention et la fiabilité globale du processus.

La **première phase** est consacrée à la **détection du feu** à l'aide d'un ensemble de capteurs infrarouges (IR) à courte portée, disposés de manière à couvrir le champ frontal du robot. Ces capteurs exploitent le rayonnement infrarouge émis par les flammes pour identifier la présence d'une source thermique. Les signaux mesurés sont transmis au microcontrôleur **ESP32**, qui assure l'acquisition et le prétraitement des données.

La **deuxième phase** correspond au **traitement et à l'analyse en temps réel des informations collectées**. L'ESP32 exécute un algorithme embarqué permettant d'interpréter les signaux issus des capteurs, de valider la présence effective d'un foyer d'incendie et d'estimer sa position relative par rapport au robot. Cette étape constitue le cœur décisionnel du système et conditionne l'ensemble des actions ultérieures.

La **troisième phase** concerne le **pilotage du déplacement** du robot en direction de la cible. Sur la base des résultats de l'analyse, des signaux de commande en **modulation de largeur d'impulsion (PWM)** sont générés par l'ESP32 afin de contrôler les moteurs à courant continu. Cette commande permet un ajustement précis de la vitesse et de la trajectoire, garantissant un positionnement optimal du robot à proximité du foyer.

Une fois la position adéquate atteinte, la **quatrième phase**, dédiée à **l'extinction de l'incendie**, est déclenchée. Elle repose sur l'activation coordonnée d'un **servomoteur** et d'une **pompe à eau électriquement commandée**, assurant le balayage ciblé de la zone impactée. Le processus d'extinction est automatiquement maintenu tant que les capteurs infrarouges détectent une émission thermique significative. Dès la disparition du rayonnement infrarouge, le système conclut à l'extinction du feu, interrompt l'intervention et replace le robot en **état de veille**.

*Fig 1 : Séquence d'opération du Robot Pompier*

L'environnement logiciel repose sur LabVIEW, qui est utilisé pour la conception des interfaces de contrôle, la programmation du comportement logique et la supervision du système. LabVIEW communique avec l'ESP32 via une liaison série, assurant l'envoi des signaux de commandes et la réception des données émises par les capteurs. L'ESP32 est également interfacé avec Firebase, une base de données cloud NoSQL, pour l'enregistrement des événements (détection, intervention, extinction) et le suivi des performances du système assurant une traçabilité à l'utilisateur.

*Fig 2 : Architecture IOT du robot*

L'environnement logiciel du système est entièrement développé sous **National Instruments LabVIEW**, un environnement graphique reconnu pour sa puissance dans les applications d'automatisation, d'acquisition de données et de supervision industrielle. LabVIEW assure trois fonctions essentielles dans ce projet :

- La conception d'interfaces homme-machine (IHM) ergonomiques et intuitives permettant à l'utilisateur de superviser en temps réel l'état du robot, de visualiser les données capteurs, de déclencher manuellement des actions et de consulter l'historique des interventions.
- La programmation complète du comportement logique du robot (algorithmes de détection de flamme, stratégie de navigation vers la source de feu, séquence d'extinction, gestion des modes dégradés, etc.) grâce à l'utilisation de structures état-machines (State Machines) et de boucles événementielles.
- La supervision globale du système, avec journalisation des événements, affichage de graphiques en temps réel et génération d'alarmes visuelles et sonores.

La communication entre l'ordinateur (ou la tablette) exécutant LabVIEW et le robot s'effectue via une **liaison série UART** (ou USB virtuel) avec la carte ESP32. Ce lien bidirectionnel permet :

- Transmet les commandes de haut niveau depuis LabVIEW vers l'ESP32 (ex. : démarrage/arrêt, mode manuel/automatique, réglage de la vitesse, activation de la pompe d'extinction, etc.).
- Remonte en continu les données brutes et traitées issues des capteurs (intensité des flammes détectées par chaque capteur IR, distance estimée, état des moteurs, niveau de batterie, température ambiante, etc.).

Par ailleurs, l'ESP32 est connecté en parallèle à **Firebase Realtime Database** (base de données NoSQL). Cette interface cloud offre une traçabilité complète et à distance du système en enregistrant chronologiquement tous les événements significatifs : détection initiale de flamme (avec horodatage et intensités mesurées), trajectoire suivie, déclenchement de l'extinction, durée de l'intervention, succès ou échec de l'extinction, ainsi que les indicateurs de performance globaux (temps de réponse, consommation énergétique, nombre d'interventions, etc.). L'utilisateur peut ainsi consulter à tout moment, depuis n'importe quel appareil connecté, un tableau de bord web ou mobile actualisé en temps réel.

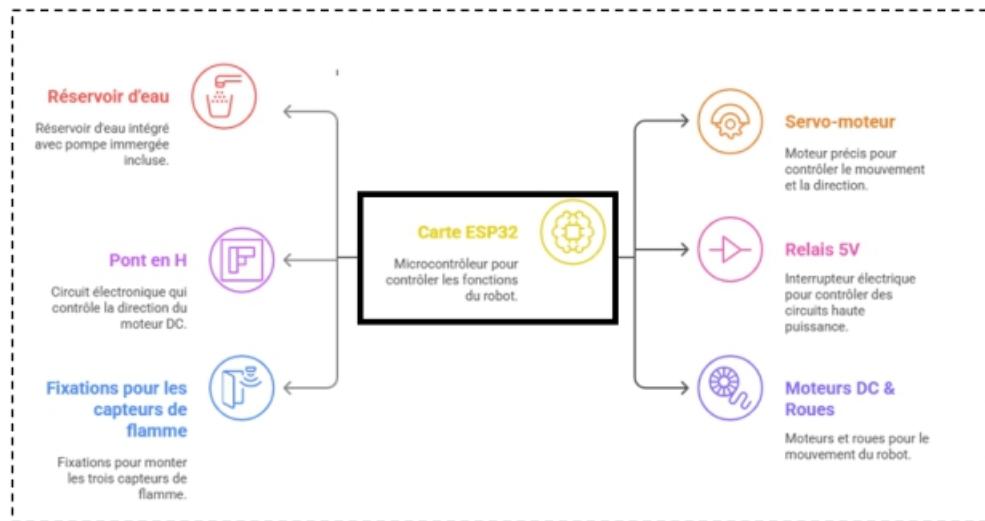


Fig 3: Architecture électrique du robot

Le cœur du système repose sur une carte **ESP32-WROOM-32**, choisie pour sa puissance de calcul, ses nombreuses entrées/sorties, son double cœur Tensilica LX6 cadencé jusqu'à 240 MHz, son module Wi-Fi/Bluetooth intégré et surtout ses deux convertisseurs analogique-numérique (ADC) 12 bits de haute précision.

La détection de la flamme est réalisée par trois capteurs infrarouges (IR) à large spectre disposés en configuration frontale triangulaire : un capteur central, un capteur gauche incliné à environ 45°, et un capteur droit incliné symétriquement. Cette disposition permet une triangulation simplifiée de la position angulaire de la source de chaleur : en comparant les intensités relatives des trois signaux, l'algorithme embarqué sur l'ESP32 détermine rapidement la direction optimale à suivre pour s'orienter vers le feu avec une précision suffisante pour un robot de petite taille.

Les signaux analogiques issus des capteurs IR sont directement connectés aux broches ADC1 de l'ESP32 (les seules utilisables lorsqu'on active le Wi-Fi). Un filtrage logiciel (moyennage glissant et rejet de valeurs aberrantes) est appliqué pour réduire le bruit et améliorer la fiabilité de la détection.

Le déplacement du robot repose sur une plateforme à deux roues différentielles entraînée par deux moteurs à courant continu à réduction. Le pilotage précis de ces moteurs (vitesse et sens) est assuré par un pont en H double canal (typiquement L298N ou DRV8833), commandé en PWM par l'ESP32. Cette architecture permet des mouvements fluides, des virages sur place et une modulation fine de la vitesse en fonction de la distance restante jusqu'au feu.

Enfin, un module d'extinction composé d'une micro-pompe péristaltique (ou ventilateur haute vitesse) et d'un réservoir d'eau (eau ou agent extincteur) est activé automatiquement dès que le robot se trouve à très courte distance de la flamme ou que l'intensité maximale dépasse un seuil critique.

L'ensemble forme ainsi une architecture IoT complète, autonome, connectée et traçable, capable à la fois d'opérer localement en temps réel et de remonter toutes les informations critiques vers le cloud et l'interface LabVIEW.

A. Dimensionnement et Conception Mécanique

La structure mécanique du robot a été entièrement conçue à l'aide du logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) **NX Siemens**, reconnu pour ses capacités avancées en modélisation paramétrique, simulation cinématique et analyse multi-physique. Le robot adopte une architecture à **deux étages mécaniques distincts**, une configuration privilégiée dans la conception de systèmes mobiles compacts, car elle permet une séparation fonctionnelle et une meilleure gestion des interactions entre sous-systèmes.

Le **niveau inférieur**, ou châssis porteur, est dédié aux éléments critiques assurant la mobilité et l'autonomie énergétique. Cette section intègre les modules de propulsion (moteurs, systèmes d'engrenages ou de transmission, roues ou chenilles selon la configuration retenue), les batteries, ainsi que les composants associés à la distribution électrique. La géométrie du châssis a été optimisée pour garantir une répartition homogène du poids, réduire le centre de gravité et assurer une

stabilité maximale du robot, notamment lors des phases dynamiques telles que l'accélération, l'arrêt d'urgence ou la rotation sur place. Les zones d'ancrage des moteurs ont été renforcées par des nervures structurales afin de limiter les déformations, tandis que les supports des batteries ont été dimensionnés pour minimiser les vibrations et prolonger leur durée de vie.

Le **niveau supérieur** constitue la plateforme fonctionnelle du robot, regroupant l'ensemble des dispositifs électroniques et électromécaniques dédiés aux opérations de perception, de commande et d'extinction. Cette partie accueille les capteurs (capteur IR, capteur de flamme, modules de distance, etc.), le système d'extinction comprenant le servomoteur orientant le jet et la pompe assurant la mise en pression du liquide, ainsi que les cartes électroniques : microcontrôleur **ESP32**, régulateur de tension, convertisseurs et interfaces de communication. L'emplacement de chaque composant a été déterminé selon une logique d'accessibilité, de minimisation des interférences électromagnétiques et de cheminement optimal du câblage interne. Une attention particulière a été portée à la dissipation thermique des composants les plus sollicités, notamment via l'ajout d'aérations et de matériaux à conduction améliorée.

Afin d'atteindre un haut niveau de précision dans l'implantation des composants, les modèles 3D des éléments électromécaniques ont été importés directement depuis la plateforme **GrabCAD**, offrant ainsi des représentations réalistes en termes de dimensions, de volume occupé et de points d'attache. Cette démarche garantit une compatibilité parfaite entre la conception virtuelle et les composants physiques réels, limitant les ajustements ultérieurs. L'intégration de ces modèles détaillés a permis de réaliser des **analyses de collision**, de vérifier les marges de sécurité entre composants et d'anticiper les contraintes liées aux mouvements, notamment ceux du servomoteur d'extinction.

La simulation au sein de NX Siemens a également permis d'évaluer la cinématique générale du robot, la dynamique de déplacement, la résistance mécanique des structures et les interactions entre pièces mobiles. Des **analyses de contraintes par éléments finis (FEA)** ont été réalisées sur les zones soumises à des charges répétitives ou à des torsions, afin d'assurer une durabilité optimale même dans des environnements opérationnels contraignants, tels que les interventions en présence de chaleur ou d'obstacles.

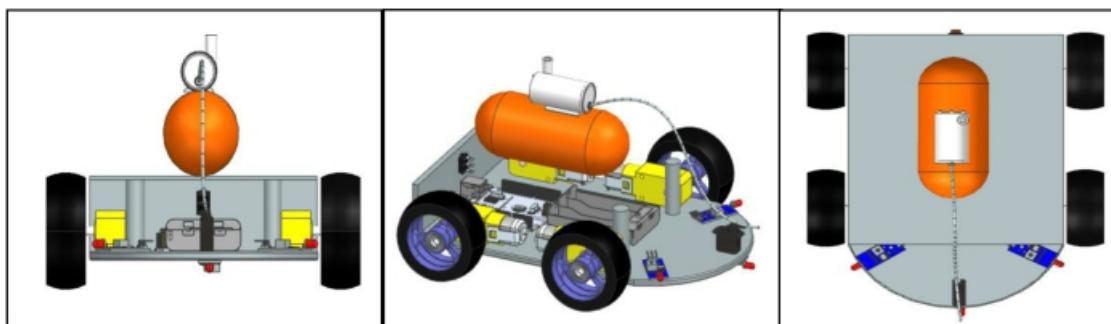


Fig 4: Conception mécanique du Robot Pompier

L'approche combinée utilisant NX Siemens et les modèles réalistes GrabCAD crée un environnement de développement virtuel extrêmement proche des conditions réelles d'utilisation. Cela permet d'identifier les défauts potentiels dès les premières phases du projet, d'optimiser la configuration mécanique et d'anticiper des problématiques telles que la distribution des masses, les risques de surcharge structurelle ou encore les interférences lors des mouvements articulés. Grâce à cette méthodologie, il est possible d'explorer différents scénarios d'implantation, de comparer plusieurs architectures mécaniques ou dispositifs de fixation, et d'aboutir à une configuration performante, fiable et adaptée aux exigences fonctionnelles du robot pompier.

En réduisant drastiquement le recours à des prototypes physiques successifs, cette stratégie de conception numérique contribue non seulement à diminuer les coûts de fabrication et les délais de développement, mais également à améliorer la fiabilité du produit final. La cohérence entre le modèle virtuel et le robot réel assure une meilleure reproductibilité, une maintenance facilitée et une évolutivité accrue de la plateforme, notamment en cas d'ajout futur de capteurs, de modules de communication ou d'accessoires fonctionnels.

B. Etude électrique et programmation

Le schéma électrique présenté ci-dessous décrit l'architecture complète du circuit de commande du robot mobile, regroupant les sous-systèmes essentiels que sont la propulsion, le contrôle embarqué, la détection d'obstacles, la gestion de l'alimentation et la sécurité électrique. Ce circuit met en évidence l'interconnexion des différents modules via un câblage structuré, assurant à la fois la transmission des signaux de commande et la distribution de puissance de manière fiable et maîtrisée. Les moteurs à courant continu ou moteurs réductés, principaux actionneurs du robot, sont alimentés à partir d'un bus de puissance stabilisé et pilotés à travers un driver ou un pont en H. Ce dernier fait office d'interface de

puissance entre le microcontrôleur et les moteurs, permettant non seulement le contrôle précis de la vitesse et du sens de rotation via PWM (Pulse Width Modulation), mais également la protection contre les surintensités ou les inversions de polarité accidentelles.

Le contrôleur embarqué, typiquement une carte ESP32 ou Arduino, constitue le cœur logique du système. Il centralise l'acquisition des données, exécute les algorithmes de décision et gère l'ensemble des signaux de commande. Sa programmation permet d'assurer le traitement en temps réel des mesures issues des capteurs, la régulation des moteurs, ainsi que l'application de stratégies de navigation ou d'évitement d'obstacles. Le contrôleur est également responsable de la gestion énergétique interne, incluant l'activation ou la désactivation sélective de certains modules afin d'optimiser la consommation du robot.

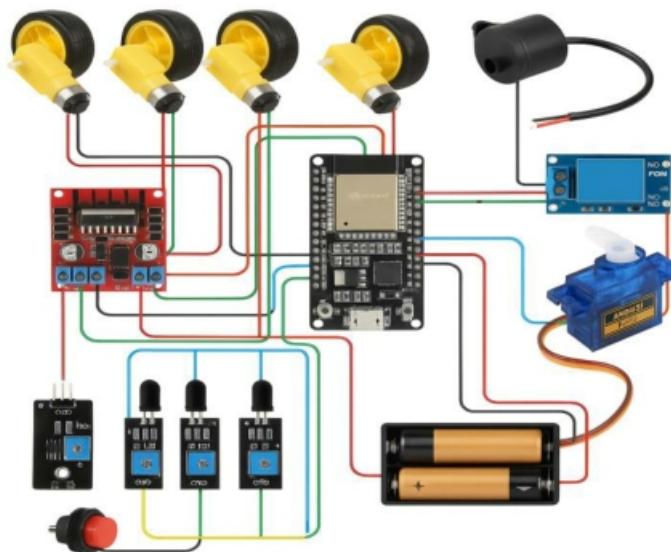


Fig 5 : Schéma du câblage électrique du robot

Les capteurs ultrasoniques, intégrés comme dispositifs de télémétrie, fonctionnent sur le principe de l'émission et de la réception d'ondes acoustiques haute fréquence. Le microcontrôleur mesure le temps aller-retour des signaux pour calculer la distance avec une précision suffisante pour la navigation autonome. Le circuit prévoit généralement des résistances pull-up ou pull-down, ainsi que des lignes de signal isolées pour réduire le bruit électrique susceptible d'affecter la précision des mesures. Ces capteurs, reliés au contrôleur via des broches numériques, fournissent une information continue permettant une adaptation dynamique de la trajectoire en cas de détection d'obstacles.

L'interrupteur principal est intégré en amont de la distribution d'alimentation afin d'assurer un isolement complet du circuit lors des phases d'arrêt ou de maintenance. Placé sur la ligne positive du bus de puissance, il garantit une coupure franche et sécurisée, empêchant toute alimentation résiduelle susceptible de provoquer un redémarrage intempestif ou un court-circuit.

Enfin, le module d'alimentation composé de batteries connectées en parallèle est conçu pour augmenter la capacité énergétique disponible tout en maintenant une tension nominale constante. Ce montage nécessite une mise en correspondance stricte des caractéristiques des batteries (capacité, niveau de charge, état de santé) pour éviter des déséquilibres internes. L'utilisation d'un régulateur de tension ou d'un convertisseur DC-DC permet d'assurer une tension stable pour les composants sensibles tels que le microcontrôleur, tandis que les moteurs, plus tolérants aux fluctuations, peuvent être alimentés directement depuis le bus parallèle. Cette configuration garantit une autonomie renforcée, une réduction des chutes de tension sous forte charge, et une fiabilité accrue du système global.

Ainsi, l'ensemble du schéma électrique constitue une architecture cohérente et optimisée, visant à fournir une gestion efficace de l'énergie, une commande précise des actionneurs, une perception fiable de l'environnement et une sécurité opérationnelle conforme aux standards des systèmes robotiques mobiles.

III. RESULTAT ET ANALYSES

Les essais expérimentaux ont confirmé la robustesse de la chaîne de traitement embarquée ainsi que la réactivité du système face à la détection d'une source thermique. Les capteurs infrarouges (IR), configurés pour une acquisition à haute fréquence et intégrés sur un bus numérique dédié, assurent une mesure fiable du rayonnement infrarouge. Les données brutes sont traitées localement par le microcontrôleur via une routine d'interruption, permettant une détection quasi instantanée de la présence d'une flamme. Dès la validation du seuil d'alerte, l'algorithme de contrôle embarqué déclenche un repositionnement automatique du châssis à l'aide d'un module de commande moteur en PWM différentiel,

garantissant un asservissement angulaire précis. Cette phase est suivie de l'activation du système d'extinction, piloté par une sortie numérique à haute capacité.

L'interface de supervision développée sous LabVIEW, interconnectée à la base de données temps réel Firebase via une API REST, assure une télémétrie continue du robot. Elle permet la visualisation en temps réel des trames de données issues des capteurs IR, incluant la détection, l'intensité radiative mesurée ainsi que la localisation spatiale déduite du modèle de perception. Cette architecture de communication permet également une journalisation distante des événements critiques.

L'analyse énergétique du système embarqué a mis en évidence que l'ensemble des modules—capteurs IR, microcontrôleur, étage de puissance moteur et actionneur d'extinction—maintient un fonctionnement stable sous une alimentation autonome fournie par une batterie 9 V. Les mesures montrent une consommation compatible avec une mission mobile sans fil, offrant une autonomie suffisante pour des scénarios d'intervention de courte durée tout en respectant les contraintes de sécurité énergétique des systèmes embarqués.

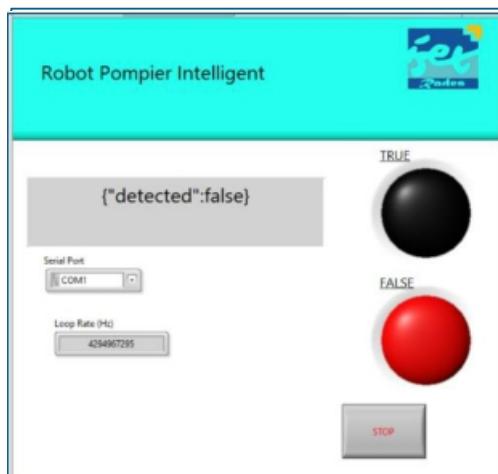


Fig6 : Interface LabVIEW



Fig7 : Prototype réel du Robot

Les figures ci-dessus illustrent les étapes principales du cycle de développement du Robot Pompier Intelligent, incluant la modélisation fonctionnelle, la simulation compo

rtementale, le prototypage électronique, l'intégration matérielle/logicielle et la validation finale du système.

L'architecture globale permet un pilotage distant via Firebase et une supervision centralisée sous LabVIEW, assurant une interaction cohérente entre l'utilisateur, les couches logicielles de contrôle et les sous-systèmes embarqués

IV. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Ce projet met en évidence la faisabilité d'une architecture robotique intelligente dédiée aux interventions de première urgence, en s'appuyant sur une chaîne de traitement distribuée entre un microcontrôleur connecté, une infrastructure cloud et une interface de supervision temps réel. L'ESP32, grâce à son double cœur Tensilica LX6, sa pile Wi-Fi/Bluetooth intégrée et sa faible latence d'interruption, offre une plateforme adaptée pour l'acquisition multisensorielle et la transmission asynchrone de données critiques. L'utilisation de Firebase comme backend temps réel permet une mise à jour continue de l'état du robot avec une latence réduite, facilitant la mise en place d'un modèle publish/subscribe pour la télémétrie et le contrôle. L'interface LabVIEW assure quant à elle une visualisation déterministe des mesures via un flux d'E/S structuré, tout en permettant l'intégration de logiques de supervision et d'alertes.

Plusieurs axes d'évolution orientés ingénierie peuvent être envisagés afin d'augmenter les capacités opérationnelles du système :

- **Intégration de capteurs visuels avancés**, tels que des caméras thermiques (MLX90640, FLIR Lepton) ou des modules compatibles OpenCV embarqué, permettant l'implémentation sur carte de pipelines de vision (edge detection, segmentation, classification temps réel) via le framework ESP-IDF ou TensorFlow Lite Micro.
- **Ajout de capteurs de perception 3D**, notamment LiDAR (RPLidar, Leddar) ou modules ultrasoniques à large faisceau, afin d'alimenter un graphe d'occupation ou une carte de coût exploitable par un module de navigation autonome.
- **Implémentation d'algorithmes de planification de trajectoire**, tels que A*, D* Lite ou RRT*, directement sur l'ESP32 ou sur un compute node secondaire (Raspberry Pi, Jetson Nano), permettant une génération de chemins optimisés sous contraintes (obstacles mobiles, zones interdites, optimisation énergétique).
- **Extension des capacités de communication**, via l'intégration de protocoles longue portée (LoRaWAN pour les

environnements à faible débit mais haute portée, ou 5G/NR pour la latence ultra-faible et la bande passante élevée), et la mise à disposition d'interfaces mobiles multiplateformes (Android/iOS) via des APIs REST ou MQTT sécurisés (TLS/SSL).

L'intégration de ces évolutions permettrait d'augmenter significativement l'autonomie décisionnelle du robot, d'améliorer la qualité des données environnementales collectées et de renforcer la robustesse de la communication dans des environnements contraints (zones sinistrées, structures métalliques, brouillage RF). À terme, ce système pourrait constituer une plateforme modulaire pour les missions de reconnaissance, d'assistance ou d'évaluation rapide dans des contextes opérationnels à forte criticité.

V. CONCLUSION

La réalisation du robot pompier intelligent met en évidence une intégration cohérente des disciplines clés de l'ingénierie des systèmes embarqués : acquisition multisensorielle, traitement distribué, actionnement mécatronique et supervision à distance via infrastructure IoT/Cloud. L'architecture matérielle, structurée autour de modules fonctionnels faiblement couplés (détection, contrôle moteur, communications, alimentation et supervision), permet une scalabilité et une maintenabilité adaptée aux scénarios d'intervention à contraintes dynamiques. Grâce à l'exploitation de capteurs embarqués (détection de flamme, température, gaz, télémétrie), combinée à un pipeline de communication bidirectionnelle reposant sur LabVIEW et Firebase, le système parvient à assurer une remontée fiable des données critiques, ainsi qu'un contrôle temps réel fondé sur des échanges événementiels et des mécanismes de mise à jour asynchrones.

Sur le plan mécatronique, la conception assure une locomotion robuste et une précision d'actionnement permettant au robot d'exécuter des manœuvres de contention du feu dans des environnements restreints. L'intégration d'algorithmes embarqués pour l'analyse rapide d'anomalies et la prise de décision locale démontre la pertinence de l'approche edge computing dans des applications fortement contraintes par le temps de réaction. Cette capacité d'évaluation et de réponse autonome résulte de la combinaison optimisée entre microcontrôleurs, modules de puissance, réseaux de capteurs et protocoles de communication tolérants aux perturbations.

L'architecture Cloud apporte un niveau supplémentaire d'orchestration et de supervision, garantissant la continuité opérationnelle même en situation de déploiement à distance. Ce couplage entre intelligence embarquée et supervision centralisée illustre l'évolution des systèmes de sécurité vers des plateformes hybrides capables de fonctionner en mode dégradé, de supporter la redondance fonctionnelle et de fournir une traçabilité complète des événements.

À plus long terme, l'adjonction de modules de vision par ordinateur, d'algorithmes avancés de perception et de décision, ainsi que de capacités d'apprentissage embarqué pourrait renforcer l'autonomie opérationnelle du robot. De telles évolutions ouvriraient la voie à un système cyber-phérique plus complet, capable d'anticiper les risques, d'optimiser ses trajectoires, de collaborer avec d'autres unités robotiques et d'évoluer dans des environnements industriels ou urbains à forte densité de contraintes. Ainsi, le robot pompier se positionne comme une plateforme technologique évolutive, illustrant la convergence stratégique entre matériels embarqués, intelligence logicielle distribuée et infrastructures Cloud au service de la sécurité civile et industrielle.

REFERENCES

- [1] H. Moravec, *Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover*, Stanford Univ., Stanford, CA, USA, 1980.
- [2] M. H. Alsharif, R. A. Albrem, H. Kim, J. Kim, and M. A. Alsharari, "Internet of Things (IoT) for Smart Firefighting and Rescue Operations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 186190–186212, 2020.
- [3] B. N. Kolamunna, J. D. M. Jayasinghe, and T. M. I. A. Tennakoon, "ESP32-Based Smart Fire Detection and Alert System," in *Proc. Int. Conf. on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, IEEE, 2022.
- [4] K. B. Swain, G. S. S. Panda, and A. K. Mallick, "Smart Industry Pollution Monitoring and Controlling Using LabVIEW-Based IoT," in *Proc. Int. Conf. on Sensing, Signal Processing and Security*, IEEE, 2017.
- [5] K. Ferencz and J. Domokos, "Using Node-RED Platform in an Industrial Environment," in *Proc. XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia*, Budapest, Hungary, 2019, pp. 52–63.
- [6] Irshad, H., Sriram, V. R., Samuel, M., Kalyan, B. B., Raj, P. S., "IOT Enabled Fire Fighting Robot," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2024.
- [7] Bhosle, A. A., Bodhe, S. S., Bodhe, S. U., Birajdar, M. M., Bodas, S. V., "Fire Fighting Robot," *IJRASET Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2022.
- [8] Sucuoglu, H. S., "Development of Real-Time Fire Detection Robotic System with Hybrid-Cascade Machine Learning Detection Structure," *Processes*, vol. 13, no. 6, 1712, 2025.
- [9] Zhang, Y., Yan, H., Zhu, D., Wang, J., Zhang, C.-H., Ding, W., Luo, X., Hua, C., Meng, M. Q.-H., "Air-Ground Collaborative Robots for Fire and Rescue Missions: Towards Mapping and Navigation Perspective," arXiv, 2024.
- [10] Jindal, K., Wang, A., Thakur, D., Zhou, A., Spurny, V., Saska, M., et al., "Design and Deployment of an Autonomous Unmanned Ground Vehicle for Urban Firefighting Scenarios," arXiv, 2021.
- [11] Nancy Noella R. S., K. D. N. Sai Kumar, K. Krishna Madhava Reddy, J. Shanthamalar, Nithya S., "A Machine Vision Based Fire Fighting Robot with Real-Time Fire Localization," *International Journal of Microsystems and IoT*, vol. 2, no. 8, pp. 1105–1111, 2024.