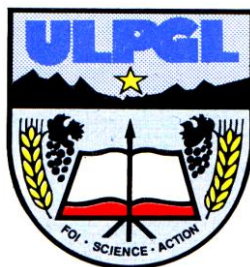


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
DOMAINE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE DE SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**Réalisation d'un système de monitoring pour la
surveillance en temps réel des transformateurs de
distribution via l'IoT : Cas de la SNEL Bukavu**

Par **BAGISHE BASHIMBE Daniel**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Gradué en Sciences et Technologies Appliquées

Option : Génie Electrique

Directeur : Prof. Dr. Ing. Alain NKIEDIEL AKWIR

Encadreur : CT. Msc. MUSONGYA BISIMWA

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« Ce qui ne peut pas être mesuré ne peut pas être amélioré »

William Thomson

Dédicace

À mes chers parents et à mon oncle, **BASHIMBE KASHOLERO, GEORGETTE NTAKOBAJIRA** et **MUDEKEREZA KASHOLERO**.

BAGISHE BASIMBE Daniel

Remerciements

Nous remercions premièrement **Dieu Tout-Puissant** de nous avoir accordé la force, santé et assuré notre protection au cours de nos recherches.

Nos sincères remerciements s'adressent à notre Directeur, le **Professeur Alain AKWIR NKIEDIEL**, qui nous a été d'une grande utilité durant tout notre cursus académique, ainsi qu'à notre Encadreur, le CT. **Msc. MUSONGYA BISIMWA Dieudonné**, pour son accompagnement précieux dans la réalisation de ce travail.

Nous remercions également les corps administratif et académique de l'**Université Libre des Pays des Grands Lacs** pour leur encadrement moral et intellectuel de qualité.

Un merci tout particulier à nos parents, **BASHIMBE KASHOLERO** et **GEORGETTE NTAKOBAJIRA**, pour leur soutien indéfectible tant sur le plan moral et spirituel que matériel.

À notre oncle, **MUDEKEREZA KASHOLERO**, pour sa présence et ses encouragements constants tout au long de ce projet.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude envers nos amis, frères et sœurs : **BABONAGE Tharcisse**, **BANSOMIRE Florence** et **CISHIBANJI Aristote**, pour leur soutien moral et leur amitié.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué, de loin ou de près, à l'aboutissement de ce travail trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Résumé

Le transformateur de distribution constitue l'organe vital du réseau électrique, mais sa défaillance imprévue due aux surcharges ou aux échauffements excessifs impacte lourdement la fourniture d'énergie à Bukavu. Ce mémoire présente la réalisation d'un système de monitoring pour la surveillance en temps réel des transformateurs de distribution via l'IoT), visant à instaurer un modèle de maintenance prédictive accessible pour ces équipements de distribution. L'objectif central de cette recherche est de mettre en place une surveillance continue des paramètres critiques (courant, tension, température de l'huile et niveau du diélectrique), afin d'alerter les techniciens avant l'apparition de pannes majeures. L'approche adoptée repose sur l'intégration du microcontrôleur ESP32 avec des capteurs de précision (ACS712, DS18B20, DHT22 et HC-SR04) et l'utilisation de la plateforme Cloud Blynk pour la visualisation des données en temps réel. Les principaux résultats obtenus démontrent une parfaite ubiquité du système, les variations électriques et thermiques étant rapportées de manière identique et synchronisée sur les interfaces Web et Mobile avec une latence minimale. Cette étude constitue une contribution modeste mais concrète pour la SNEL Bukavu, démontrant qu'une transition d'une maintenance curative coûteuse vers une stratégie prédictive proactive est envisageable grâce aux technologies numériques, garantissant ainsi une meilleure longévité des transformateurs de distribution et une stabilité accrue du réseau local.

Mots-clés : IoT, Maintenance prédictive, Transformateur de distribution, ESP32, SNEL Bukavu, Suivi en temps réel.

Abstract

The distribution transformer is the vital organ of the electrical grid; however, unforeseen failures caused by overloads or excessive overheating severely impact the energy supply in Bukavu. This thesis presents the implementation of an IoT-based monitoring system for the real-time surveillance of distribution transformers, aiming to establish an accessible predictive maintenance model for this equipment. The central objective of this research is to implement continuous monitoring of critical parameters (current, voltage, oil temperature, and dielectric level) to alert technicians before major failures occur. The adopted approach is based on the integration of the ESP32 microcontroller with precision sensors (ACS712, DS18B20, DHT22 and HC-SR04) and the use of the Blynk Cloud platform for real-time data visualization. The main results demonstrate the system's seamless ubiquity, as electrical and thermal variations are reported identically and synchronously across Web and Mobile interfaces with minimal latency. This study represents a modest but concrete contribution to SNEL Bukavu, demonstrating that a transition from costly curative maintenance to a proactive predictive strategy is feasible through digital technologies, thereby ensuring enhanced longevity for distribution transformers and increased stability of the local grid.

Keywords: IoT, Predictive Maintenance, Distribution Transformer, ESP32, SNEL Bukavu, Real-time Monitoring.

Table des matières

Epigraphe.....	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des abréviations.....	Error! Bookmark not defined.
Liste des figures	x
Liste de tableaux	1
0. Introduction générale.....	2
0.1. Contexte.....	2
0.2. Problématique	3
0.3. Questions de recherche.....	3
0.4. Hypothèses.....	4
0.5. Justification du choix du sujet et motivations.....	4
0.6. Objectifs du travail.....	5
0.8. Délimitation du travail.....	Error! Bookmark not defined.
0.9. Subdivision du travail.....	7
Chapitre 1 Généralités et revue de la littérature.....	9
1.1 Généralités sur les transformateurs de puissance.....	9
1.1.1 Définition.....	9
1.1.2 Principe de fonctionnement	11

1.1.3	Constitution du transformateur de puissance.....	12
1.1.4	Classification et typologie des transformateurs	15
1.1.5	Contextes d'utilisation des transformateurs	18
1.1.6	Pannes et défauts courants.....	20
1.2	Étude et maintenance des équipements	21
1.2.1	La maintenance corrective (ou curative)	22
1.2.2	La maintenance préventive systématique	22
1.2.3	La maintenance prédictive (ou conditionnelle)	22
1.2.4	Importance de la maintenance prédictive pour les transformateurs.....	23
1.3	La technologie IOT (Internet of Things)	25
1.3.1	Définition.....	25
1.3.2	Architecture du système de monitoring par IoT	26
1.3.3	Capteurs dans l'écosystème IoT industriel	27
1.3.4	Écosystème des protocoles de communication IoT	29
1.3.5	Protocoles de Couche Application	31
1.3.6	Couche de traitement des données et prise de décision	32
1.3.7	Domaines d'application de l'IoT	34
1.4	Conclusion partielle.....	35
Chapitre 2 Etude technique et modélisation du système de surveillance d'un transformateur.....		36
2.1	Introduction.....	36
2.2	Étude technique des composants du système	36
2.2.1	Architecture globale du système	36
2.2.2	Choix des composants.....	38
2.2.3	Étude logicielle et Environnement de simulation	44
2.3	Modélisation du système de surveillance	48
2.3.1	Fonctionnement général du système	48

2.3.2	Schéma fonctionnel du système de surveillance.....	49
2.3.3	Résultats de la Modélisation Technique.....	52
2.4	Liste du matériel électronique utilisé	56
2.5	Conclusion partielle.....	59
Chapitre 3 Intégration matérielle et simulation virtuelle du dispositif de supervision.....		60
3.1	Introduction.....	60
3.2	Simulation virtuelle sur Proteus.....	60
3.3	Conception de la structure mécanique en bois par CNC	65
3.4	Tests et validation du prototype	Error! Bookmark not defined.
3.4.1	Test de surveillance thermique et environnementale (DHT11 et DS18B20)....	68
3.4.2	Test de monitoring thermique de l'huile (Sonde DS18B20)	72
3.4.3	Test de monitoring du niveau d'huile (Capteur Ultrasonique HC-SR04)	74
3.4.4	Test de surveillance de la tension primaire	78
3.4.5	Test de monitoring de la tension secondaire	80
3.4.6	Test de monitoring du courant de charge	83
3.4.7	Notifications mobiles	86
3.5	Conclusion partielle.....	90
Conclusion générale.....		91
Contributions.....		92
Critique du travail.....		93
Travaux futurs de recherche/Perspectives		93
Bibliographie		95
Annexe A Devis Détaillé du Système de Surveillance		103
Annexe B Code ESP32		106

Liste des abréviations

IoT : Internet of Things (Internet des Objets)

CEI : Commission Électrotechnique Internationale (norme de référence pour vos calculs thermiques)

M2M : Machine to Machine (Communication entre machines)

MQTT : Message Queuing Telemetry Transport (Le protocole standard pour l'IoT)

SNEL : Société Nationale d'Électricité

ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

Wi-Fi : Wireless Fidelity

TFC : Travail de Fin de Cycle

RAM: Random Access Memory

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

HTA : Haute Tension A (concerne les réseaux de distribution de la SNEL)

CEI : Commission Électrotechnique Internationale (norme de référence pour vos calculs thermiques).

BT : Basse Tension

MCU : Micro Controller Unit (Unité de Microcontrôleur).

LCD : Liquid Crystal Display (Écran à Cristaux Liquides).

I/O: Input / Output (Entrées / Sorties).

I2C : Inter-Integrated Circuit (Protocole de communication série utilisé pour l'écran LCD).

IHM : Interface Homme-Machine

Liste des figures

Figure 1-1 Architecture générale d'un transformateur électrique industriel [18].	11
Figure 1-2 Vue en coupe d'un transformateur de distribution [22].	14
Figure 1-3 Modernisation du réseau électrique [29]	20
Figure 1-4 Comparaison des processus décisionnels des stratégies de maintenance.	24
Figure 1-5 IoT Architecture [42].	27
Figure 1-6 Protocoles de réseau IoT sans fil [55].	31
Figure 1-7 Architecture logique et flux de données de la couche application	34
Figure 2-1 Architecture globale du système	37
Figure 2-2 ESP32-WROOM-32[70]	39
Figure 2-3 Capteur de courant ACS712 [72]	40
Figure 2-4 Capteur de température DS18B20 [77]	41
Figure 2-5 Capteur d'hygrométrie DHT22 [80]	42
Figure 2-6 Capteur ultrasons HC-SR04 [82]	43
Figure 2-7 Ecran LCD 16x2 avec Interface I2C [85]	44
Figure 2-8 IDE Arduino [89]	46
Figure 2-9 Interface Proteus ISIS [90]	47
Figure 2-10 Interface Blynk IoT	48
Figure 2-11 Schéma fonctionnel système de surveillance.	50
Figure 2-12 Schéma bloc du système de surveillance.	51
Figure 2-13 Modèle électronique sous Proteus du système de surveillance	52
Figure 2-14 le tableau de bord de supervision sans données version web	54
Figure 2-15 le tableau de bord de supervision avec données version web	55
Figure 2-16 le tableau de bord de supervision version Mobile	55
Figure 3-1 Simulation du système en mode démarrage sous Proteus	61
Figure 3-2 Simulation du système en cours et affichage des résultats	62

<i>Figure 3-3 Simulation du système en cours et affichage des résultats</i>	<i>63</i>
<i>Figure 3-4 Simulation du système en cours et affichage des résultats</i>	<i>64</i>
<i>Figure 3-5 les faces du boîtier en bois</i>	<i>66</i>
<i>Figure 3-6 découpage sur la machine CNC</i>	<i>66</i>
<i>Figure 3-7 Assemblage du boîtier après découpage vue 3D.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 3-8 Affichage local et dht 11 en condition normale</i>	<i>68</i>
<i>Figure 3-9 Affichage des résultats web et mobile.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 3-10 Test avec fer à souder</i>	<i>70</i>
<i>Figure 3-11 Affichage des résultats web et mobile.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 3-12 Brumisateur et test de l'humidité.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 3-13 Affichage de résultat sur l'écran LCD.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 3-14 Affichage des résultats web et mobile.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure 3-15 Affichage de résultat sur LCD et sonde a l'air libre</i>	<i>73</i>
<i>Figure 3-16 Affichage des résultats web et mobile.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 3-17 Affichage de résultat sur LCD et sonde plongée dans l'eau chaude.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 3-18 Affichage des résultats web et mobile.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 3-19 Affichage de résultat sur LCD.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 3-20 Déplacement de l'obstacle</i>	<i>75</i>
<i>Figure 3-21 Affichage a l'instant sur mobile.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 3-22 Graphique montra les variations sur mobile</i>	<i>76</i>
<i>Figure 3-23 Graphique montra les variations sur web.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 3-24 Graphique montra le graphique primaire sur mobile</i>	<i>78</i>
<i>Figure 3-25 Affichage à l'instant sur mobile.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 3-26 Graphique montra les variations de la tension primaire sur web.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 3-27 appareil analogique montre la tension primaire.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 3-28 Graphique montra la tension secondaire sur mobile</i>	<i>81</i>
<i>Figure 3-29 Affichage a l'instant sur mobile.....</i>	<i>81</i>

<i>Figure 3-30 Graphique montra les variations de la tension secondaire sur web</i>	<i>82</i>
<i>Figure 3-31 Appareil analogique montre la tension secondaire</i>	<i>83</i>
<i>Figure 3-32 Graphique montra le graphique du courant de charge sur mobile.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 3-33 Affichage a l'instant sur mobile.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 3-34 Graphique montra les variations du courant de charge sur web.....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 3-35 Interface Blynk lors d'un test de charge simulant une anomalie d'intensité.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 3-36 Notification de sécurité générée par le capteur de niveau d'huile.</i>	<i>88</i>

Liste de tableaux

<i>Tableau 2-1 Inventaire et fonctions du matériel électronique de contrôle.</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 3-1 Comparaison entre la surveillance classique et le système IoT proposé</i>	<i>89</i>

0. Introduction générale

0.1. Contexte

Au sein du réseau de distribution de la SNEL Bukavu, le transformateur de distribution occupe une place centrale, agissant comme le pivot entre la production (issue de la centrale de la Ruzizi) et la consommation d'une population en constante croissance. En raison de son coût d'acquisition très élevé et de sa position stratégique dans les quartiers de Bukavu, toute défaillance de cet équipement entraîne non seulement des pertes financières directes pour la SNEL, mais aussi des ruptures de service prolongées impactant lourdement les activités socio-économiques de la ville [1].

Face à l'augmentation constante de la demande énergétique locale, marquée par des phénomènes de surcharges fréquentes et des branchements anarchiques, les méthodes traditionnelles de maintenance souvent trop tardives (curatives après explosion ou brûlure) ou inutilement fréquentes (systématiques malgré le manque de personnel) atteignent aujourd'hui leurs limites techniques à Bukavu, dans ce paysage technologique en pleine mutation, l'Internet des Objets (IoT) s'impose comme une solution de rupture adaptée au contexte local. En permettant une surveillance continue et à distance des paramètres critiques tels que la température des enroulements, le niveau d'huile et les courants de charge, l'IoT transforme le transformateur "passif" de la SNEL en un actif "intelligent" [2].

Cette transition vers la maintenance prédictive vise à anticiper le comportement thermique pour maximiser la durée de vie résiduelle de la machine, évitant ainsi des remplacements coûteux dans un contexte économique difficile [3].

0.2. Problématique

En République Démocratique du Congo et plus particulièrement à Bukavu, le réseau de distribution électrique fait face à des contraintes sévères liées à l'instabilité des charges et à des conditions environnementales exigeantes. Dans ce contexte, les transformateurs de puissance sont souvent exploités à la limite de leurs capacités nominales, ce qui accélère leur vieillissement thermique [4]. Le problème majeur réside dans l'utilisation de méthodes de maintenance dites "de survie" : on intervient généralement après la panne (maintenance curative), ce qui entraîne des délestages prolongés et des coûts de remplacement exorbitants pour les opérateurs nationaux et privés.

L'absence de monitoring en temps réel empêche la détection précoce des anomalies telles que la montée en température de l'huile isolante ou les déséquilibres de phases chroniques. Or, une augmentation de seulement 8°C au-dessus de la température de calcul peut réduire de moitié la durée de vie de l'isolation d'un transformateur [5]. Sans un outil capable de simuler et de prédire ces comportements, la gestion du parc de transformateurs reste réactive, inefficace et coûteuse pour l'économie nationale.

0.3. Questions de recherche

L'évolution actuelle des réseaux électriques vers le paradigme des "Smart Grids" montre que la simple protection contre les surcharges ne suffit plus à garantir la longévité des actifs [9]. Malgré les avancées technologiques, la corrélation entre les données collectées en temps réel et les modèles thermiques théoriques reste un défi majeur pour la maintenance prédictive [10].

- a) De quelle manière la modélisation et la simulation d'un système basé sur l'IoT peuvent-elles permettre de passer d'une maintenance préventive classique à une stratégie prédictive optimisée pour les transformateurs de puissance ?

- b) Dans quelle mesure le couplage des données de charge et de température d'huile permet-il de constituer un jeu de données minimal robuste pour prédire l'accélération du vieillissement des transformateurs de distribution de la SNEL ?
- c) Comment l'utilisation d'une interface de monitoring virtuelle peut-elle faciliter la prise de décision technique pour les techniciens de maintenance en milieu urbain ?

0.4. Hypothèses

En réponse aux questions de recherche formulées précédemment, nous émettons les hypothèses suivantes :

- a) La mise en place d'un modèle de simulation couplé à l'IoT permettrait de transformer la maintenance des transformateurs en remplaçant les inspections visuelles périodiques par une surveillance continue. Cela permettrait de détecter les signatures thermiques de défaillance bien avant que le transformateur ne subisse un dommage irréversible [14].
- b) La surveillance combinée de la température de l'huile et de la charge électrique constituerait le jeu de données minimal serait suffisant pour prédire le vieillissement accéléré de l'isolant selon les lois d'Arrhenius adaptées aux transformateurs [15].
- c) En milieu urbain, une interface de monitoring virtuelle faciliterait la prise de décision en permettant au technicien d'identifier à distance si une anomalie est due à une surcharge réseau (ex : pics de consommation) ou à un défaut interne de la machine. Cette distinction permettrait une intervention ciblée, évitant ainsi des coupures généralisées inutiles et réduisant les coûts logistiques liés aux déplacements en zone dense [16].

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

Le choix de cette thématique est dicté par une convergence d'enjeux techniques, économiques et contextuels propres au secteur de l'énergie en République Démocratique du Congo.

(i). Sur le plan technique

L'obsolescence des modes de maintenance actuels en RDC, souvent limités au curatif, expose les transformateurs à des défaillances prématurées. L'intégration de l'IoT représente une rupture technologique majeure qui permet de passer d'un équipement passif à un système communicant capable d'autodiagnostic [6].

(ii). Sur le plan socio-économique

À Bukavu comme dans d'autres villes de la RDC, l'avarie d'un transformateur de quartier plonge des centaines de ménages dans l'obscurité pendant des semaines, faute de moyens rapides pour le remplacement. Ce sujet se justifie par la volonté de réduire ces temps d'arrêt en anticipant les pannes, protégeant ainsi le patrimoine de la société distributrice et garantissant la continuité de service pour la population [7].

(iii). Sur le plan académique

En tant que futur ingénieur, ce travail nous permet de concilier les théories classiques des machines électriques avec les outils modernes de la data-science et des systèmes embarqués. Il s'agit de démontrer qu'une solution logicielle de simulation peut offrir une aide à la décision fiable sans nécessiter de lourds investissements matériels immédiats [8].

0.6. Objectifs du travail

L'objectif global de ce travail consiste à concevoir un modèle de simulation numérique pour surveiller à distance un transformateur de distribution via l'IoT, tout en réalisant un prototype physique pour valider expérimentalement le système. Pour y arriver, nous allons poursuivre les objectifs spécifiques suivants :

- a) Analyser l'ensemble des paramètres critiques, incluant les grandeurs électriques (tensions primaire/secondaire, charge), les indicateurs internes (température et niveau d'huile) ainsi que les facteurs environnementaux (température et humidité ambiantes), afin d'automatiser la surveillance globale du transformateur. Cette approche permet de

détecter en temps réel les anomalies multidimensionnelles pouvant affecter la performance et la durée de vie de l'équipement.

- b) Développer une simulation numérique complète du système de monitoring, dédiée à la collecte et à la visualisation en temps réel de l'ensemble des paramètres (tensions, charge, niveau d'huile, températures et humidité). Cette étape vise à modéliser le comportement du système et à valider les algorithmes de traitement des données avant leur intégration sur le support matériel.
- c) Valider la fiabilité de la transmission des données par la simulation de variations multi-paramètres : reproduire des changements d'état (fluctuations de tensions, surcharges, hausses de température ou baisse du niveau d'huile) pour vérifier la précision du système de supervision. L'objectif est de garantir que les informations captées (électriques, internes et ambiantes) sont fidèlement transmises à l'interface de contrôle, permettant ainsi un suivi technique précis et à distance, sans nécessiter une inspection physique permanente du transformateur.

0.7. Méthodologie

Pour réaliser cette étude, nous avons adopté une démarche expérimentale s'appuyant sur la simulation numérique et le prototypage, structurée en trois étapes principales :

- (a) La recherche documentaire : Elle nous a permis de collecter des informations théoriques dans des ouvrages, des articles scientifiques et des normes internationales (comme la CEI 60076-7) concernant les transformateurs et les technologies IoT.
- (b) Simulation technique sous Proteus : nous concevons une architecture électronique virtuelle. L'outil Proteus nous permet de simuler le circuit de contrôle, l'acquisition des données via des capteurs virtuels et l'intelligence du microcontrôleur. Cette étape valide la logique du système et le traitement des données avant l'implémentation physique.
- (c) L'intégration IoT et supervision via Blynk : Ce dispositif est couplé à la plateforme Blynk, pour assurer la transmission et la visualisation des paramètres du transformateur

sur un tableau de bord en ligne. Cette étape permet de tester la remontée des données en temps réel et de valider les mécanismes d'alerte à distance.

0.8. Délimitation du travail

Cette étude se concentre sur le développement d'un système de monitoring multi-paramètres dédié à la surveillance en temps réel des transformateurs de distribution. Le périmètre de notre recherche englobe le suivi des grandeurs électriques fondamentales, à savoir les **tensions primaire et secondaire** ainsi que la **charge électrique**, complété par le contrôle des indicateurs internes que sont la **température** et le **niveau de l'huile**. Par ailleurs, afin de tenir compte des conditions d'exploitation, le dispositif intègre la mesure de la **température et de l'humidité ambiantes** au sein de la cabine. En revanche, les défaillances d'origine purement mécanique (vibrations), les analyses chimiques complexes (gaz dissous) ou les interventions sur les accessoires tels que le changeur de prises sont exclues de ce travail. Géographiquement, notre zone d'étude est centrée sur la ville de **Bukavu** (RDC) et cible spécifiquement le réseau de la **SNEL**, dans le cadre de l'année académique **2024-2025**.

0.9. Subdivision du travail

Hormis l'introduction et la conclusion générale, ce travail est structuré en trois chapitres principaux :

Chapitre 1 : Généralités et revue de la littérature. Ce chapitre définit les concepts fondamentaux de l'Internet des Objets (IoT) et expose les généralités essentielles sur les transformateurs de puissance. Cette base théorique permet de comprendre le rôle crucial de la surveillance connectée pour assurer la fiabilité et la pérennité de ces équipements électriques.

Chapitre 2 : Etude technique et modélisation du système de surveillance d'un transformateur. Ce chapitre constitue le socle théorique et conceptuel de notre solution.

L'objectif n'est pas seulement de présenter des outils, mais de construire une architecture logique et électronique, articulée autour de Proteus et Blynk, capable de simuler et de superviser le fonctionnement réel d'un transformateur de la SNEL.

Chapitre 3 : Intégration matérielle et simulation virtuelle du dispositif de supervision

Ce chapitre présente la phase de mise en œuvre pratique de notre système de surveillance. Il détaille d'une part la simulation virtuelle réalisée sous l'environnement Proteus, permettant de valider la logique de programmation et le comportement des capteurs. D'autre part, il expose l'intégration matérielle à travers la construction d'une maquette physique regroupant les interfaces analogiques et numériques.

Chapitre 1

Généralités et revue de la littérature

Le présent chapitre dresse le cadre théorique nécessaire à la compréhension de l'interaction entre les systèmes de conversion d'énergie électrique et les technologies de surveillance numérique. Il s'articule autour de trois piliers : la machine électrique (le transformateur), la science de la maintenance et l'écosystème de l'Internet des Objets (IoT).

1.1 Généralités sur les transformateurs de puissance

Le transformateur est l'élément pivot des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Sa capacité à adapter les niveaux de tension avec un rendement extrêmement élevé en fait un équipement indispensable, mais dont la surveillance est cruciale pour la pérennité du réseau.

1.1.1 Définition

D'un point de vue normatif, la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) définit le transformateur comme un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et de courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique [14].

Au sein des infrastructures de production d'énergie, les transformateurs occupent une place centrale et déterminante. Afin de garantir un transport optimal de l'électricité à travers les réseaux de grande envergure, il est impératif d'élever le niveau de tension à l'aide de transformateurs dits « élévateurs ». Ce processus technique est primordial, car il permet de limiter drastiquement les déperditions énergétiques qui surviennent naturellement lors du transit dans les câbles. Une fois que l'électricité approche de sa destination, le système s'inverse

: des transformateurs de distribution interviennent pour réduire la tension. Ce passage à un voltage inférieur est nécessaire pour que l'énergie puisse être injectée dans les réseaux locaux. Ce mécanisme global est donc le garant d'une transmission électrique performante et fiable. En résumé, si les modèles élévateurs optimisent le voyage du courant en haute tension pour éviter les pertes en ligne, les versions de distribution adaptent cette force aux besoins des usagers. Cela rend possible l'alimentation sécurisée de nos infrastructures urbaines ainsi que de nos objets du quotidien, allant des systèmes d'éclairage modulables aux composants électroniques les plus sensibles [15].

Au-delà de cette définition, le transformateur joue un rôle de séparation galvanique entre deux réseaux, assurant ainsi une sécurité contre les défauts électriques directs, dans le contexte spécifique de la SNEL en République Démocratique du Congo, le transformateur de distribution assure l'interface finale entre le réseau Moyenne Tension (HTA) et les consommateurs finaux en Basse Tension (BT) [16].

Le rôle fondamental d'un transformateur constitue le maillon essentiel permettant la circulation du courant alternatif (AC). Son objectif principal est de transporter la puissance électrique depuis les centrales jusqu'aux utilisateurs finaux. En adaptant les niveaux de tension à chaque étape du parcours, il permet d'atteindre une efficacité maximale en limitant les pertes énergétiques inhérentes au transport. [17]

Son rôle ne se limite pas à la conversion de tension ; il doit également supporter les contraintes thermiques liées aux cycles de charge urbains. La figure 1-1 ci-dessous montre l'architecture générale d'un transformateur.

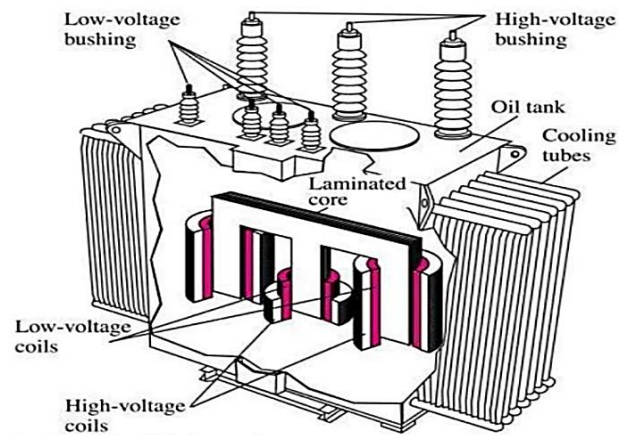


Figure 1-1 Architecture générale d'un transformateur électrique industriel [18].

- **Laminated core** : Circuit magnétique.
- **Low-voltage coil** : Enroulement basse tension.
- **High-voltage coil** : Enroulement haute tension.
- **Low-voltage bushing** : Traversées basse tension.
- **High-voltage bushing** : Traversées haute tension.
- **Oil tank Cuve** : Cooling tubes Tubes de refroidissement.

1.1.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du transformateur repose sur une synergie de lois physiques découvertes au XIXe siècle, dont la plus fondamentale est la loi de l'induction mutuelle.

L'existence même du transformateur découle des travaux de **Michael Faraday** qui, en 1831, démontra qu'un champ magnétique variable à l'intérieur d'un circuit fermé induit une force électromotrice (f.é.m.). Dans la littérature académique, le transformateur est défini comme l'application directe de cette découverte : il utilise un flux magnétique fluctuant pour transférer

l'énergie d'un enroulement à un autre sans aucun contact électrique [19]. Cette isolation galvanique est l'un des piliers de la sécurité des réseaux électriques modernes.

Lorsqu'on applique une tension alternative à l'enroulement primaire, un courant circule et transforme ce dernier en une source de champ magnétique. Ce champ prend la forme d'un flux magnétique qui varie au même rythme que la fréquence du réseau [16].

Pour maximiser l'efficacité du transfert selon Faraday, le transformateur utilise un noyau ferromagnétique. Ce noyau joue un rôle de conducteur magnétique : il emprisonne les lignes de force du champ pour les diriger presque intégralement vers l'enroulement secondaire, limitant ainsi les "fuites" magnétiques dans l'air [20].

En traversant l'enroulement secondaire, le flux magnétique variable "coupe" les conducteurs de cuivre. En vertu de la loi de Faraday-Lenz, une tension est alors induite aux bornes du secondaire. Cette tension sera proportionnelle au nombre de spires, permettant ainsi d'élever ou d'abaisser le niveau de tension initial [14].

Il est crucial de noter que le principe est complété par la **loi de Lenz**, qui stipule que le courant induit s'oppose par ses effets à la cause qui lui a donné naissance. Cette loi est essentielle dans la littérature technique car elle explique l'équilibre de puissance du transformateur : le courant appelé au secondaire dicte la consommation au primaire. Toute anomalie dans ce processus (surcharge, défaut d'isolement) entraîne une élévation de température, ce qui justifie la nécessité d'un système de monitoring en temps réel [19].

1.1.3 Constitution du transformateur de puissance

La constitution d'un transformateur de puissance est un compromis entre l'optimisation du flux magnétique, l'isolation électrique et la dissipation thermique. La littérature spécialisée divise généralement l'appareil en deux parties : la partie active (où se produisent les phénomènes physiques) et les accessoires de protection et de refroidissement [16].

1.1.3.1 La partie active

Elle est le cœur de la machine et se compose de deux éléments indissociables :

- **Le circuit magnétique ;** pour que la loi de Faraday s'exerce avec le meilleur rendement, le flux doit être guidé par un matériau à haute perméabilité. Le circuit magnétique est constitué d'un empilage de fines tôles d'acier au silicium, isolées entre elles par un vernis spécial. Cette structure feuilletée est indispensable pour minimiser les pertes par courants de Foucault (courants induits parasites qui chauffent le métal) [20].
- **Les enroulements (Circuits électriques) :** Ils sont formés de bobines de cuivre ou d'aluminium. Le primaire reçoit l'énergie, tandis que le secondaire la restitue. L'isolation entre les spires et entre les enroulements eux-mêmes est assurée par des matériaux cellulosiques (papier isolant) imprégnés d'huile, garantissant une tenue diélectrique face aux hautes tensions [21].

1.1.3.2 Le système d'isolation et de refroidissement (La cuve)

Sur les réseaux de la SNEL, on utilise majoritairement des transformateurs dits "immergés".

- **L'huile isolante (minérale) :** Elle remplit deux fonctions vitales. D'une part, elle renforce l'isolation électrique entre les parties sous tension et la carcasse. D'autre part, elle sert de fluide caloporteur : elle absorbe la chaleur des bobinages et l'évacue vers les radiateurs extérieurs par convection naturelle ou forcée [16].
- **La cuve et les radiateurs :** La cuve en acier protège la partie active et contient l'huile. Les ailettes ou radiateurs sur les côtés augmentent la surface d'échange avec l'air ambiant pour refroidir l'huile.

1.1.3.3 Les organes de raccordement et de sécurité

- **Les traversées (Bushings) :** Ce sont des isolateurs en porcelaine ou en résine qui permettent de faire sortir les conducteurs de la cuve métallique sans créer de court-circuit.
- **Le conservateur (Vase d'expansion) :** Présent sur les gros modèles, il permet à l'huile de se dilater librement sous l'effet de la chaleur sans faire exploser la cuve.
- **Le relais Buchholz :** Organe de protection critique qui détecte les dégagements gazeux anormaux à l'intérieur de la cuve, signes précurseurs d'un défaut interne [19]. La figure 1-2 ci-dessous montre la vue en coupe d'un transformateur de distribution.

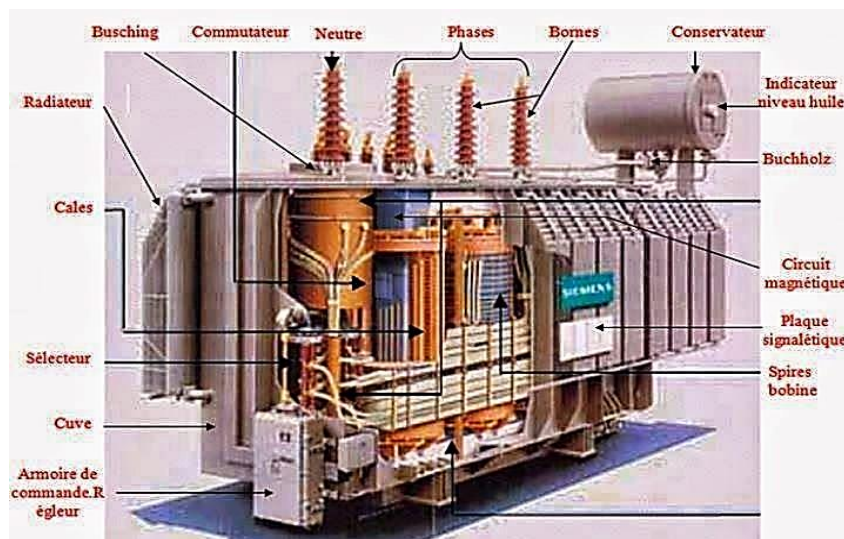


Figure 1-2 Vue en coupe d'un transformateur de distribution [22].

1.1.4 Classification et typologie des transformateurs

La diversité des configurations des réseaux électriques et les exigences spécifiques des environnements industriels ont conduit à une spécialisation des transformateurs. Leur classification ne repose pas uniquement sur leur apparence, mais sur leur rôle stratégique dans la chaîne énergétique, leurs contraintes thermiques et leur milieu d'installation [16].

1.1.4.1 Classification selon le rôle fonctionnel dans le réseau

Le réseau électrique est hiérarchisé, et chaque niveau de tension nécessite une architecture de transformation adaptée :

- **Les Transformateurs de Puissance (Transport et Interconnexion) :** Considérés comme les "géants" du système électrique, les transformateurs de puissance sont conçus pour gérer des flux d'énergie massifs. Ils sont positionnés aux points de jonction entre les centrales de production et les lignes de haute tension. Leur conception est optimisée pour minimiser les pertes fer et cuivre, car un rendement même très élevé (99 %) sur une machine de plusieurs centaines de MVA représente une perte de chaleur colossale. Ils sont dotés de systèmes de refroidissement complexes (radiateurs, ventilateurs, pompes à huile) et de changeurs de prises en charge permettant de réguler la tension sans couper le courant, garantissant ainsi la stabilité du réseau de transport [20]
- **Les Transformateurs de Distribution (Interface de Service) :** Ce sont les unités les plus nombreuses, installées à proximité des consommateurs finaux. Ils assurent l'ultime étape de la conversion en abaissant la moyenne tension (HTA) en basse tension (BT). Contrairement aux transformateurs de puissance qui fonctionnent souvent à charge constante, les transformateurs de distribution subissent de fortes fluctuations de charge selon les habitudes de consommation urbaine. Ils sont particulièrement vulnérables aux harmoniques et aux déséquilibres de phases générés par les charges non-linéaires des ménages. Dans les réseaux de la SNEL en RDC, ils sont le point critique du monitoring,

car leur défaillance entraîne une interruption directe du service pour des centaines d'abonnés [19].

1.1.4.2 Classification selon le milieu d'isolation et de refroidissement

Le choix du fluide isolant est le paramètre le plus critique pour la gestion thermique et la sécurité incendie :

- **Transformateurs immergés dans le liquide (Huile minérale) :** Ils représentent plus de 90 % du parc mondial en extérieur. L'huile minérale joue un double rôle : isolant diélectrique et fluide caloporteur. L'huile permet une meilleure dissipation des "points chauds" (hotspots) grâce à la convection naturelle vers les radiateurs. Cependant, ils nécessitent un monitoring strict pour prévenir les risques de fuites et d'incendie [14].
- **Transformateurs de type sec (Résine enrobée) :** Utilisés dans les environnements où le risque d'incendie doit être réduit à zéro (hôpitaux, gratte-ciels, mines). Ici, le milieu isolant est solide. Ces transformateurs sont « auto-extinguibles ». La technique de coulée sous vide de la résine garantit l'absence de bulles d'air, prévenant ainsi les décharges partielles, qui sont les principaux ennemis des isolants solides. Toutefois, leur inertie thermique est plus faible que celle des modèles immergés : ils montent plus vite en température et nécessitent une surveillance stricte de la température des enroulements via des sondes PT100, car un dépassement de la classe thermique de la résine peut provoquer des fissures irréversibles [23].

1.1.4.3 Transformateurs de mesure et de protection (L'instrumentation)

Ces appareils sont les "yeux" des systèmes de surveillance. Ils ne transmettent pas de puissance mais de l'information :

- **Transformateurs de Courant (TC) :** Ils réduisent les courants élevés du réseau à des valeurs proportionnelles (généralement 1A ou 5A) pour alimenter les ampèremètres et

les relais. Avec une précision de l'ordre de 0,2 % (classe de précision). La littérature avertit sur le danger mortel d'ouvrir le secondaire d'un TC en charge : cela provoque une surtension destructive capable d'exploser l'isolateur. Ils sont les sources de données primaires pour tout système de monitoring IoT [19].

- **Transformateurs de Tension (TP)** : Ils abaissent les hautes tensions à des valeurs sécurisées (100V ou 110V) pour la mesure. La fidélité de la reproduction du signal (classe de précision) est ici le critère primordial. Toute saturation du circuit magnétique d'un TC peut fausser les données de votre système de monitoring IoT et entraîner des erreurs de diagnostic [19].

1.1.4.4 Selon le nombre de phases

- **Monophasés** : Utilisés pour des petites puissances ou dans des zones rurales.
- **Triphasés** : C'est le standard industriel et urbain. Ils sont constitués de trois colonnes magnétiques et permettent de transporter l'énergie avec un meilleur rendement global. Le transformateur triphasé constitue un élément central des systèmes polyphasés modernes. Bien que la création d'un système triphasé puisse techniquement reposer sur l'assemblage de trois transformateurs monophasés, l'utilisation d'une unité monobloc intégrée est systématiquement privilégiée pour sa rentabilité supérieure et son efficacité opérationnelle accrue. Cet équipement repose sur trois jeux d'enroulements primaires et secondaires dont les configurations de couplage, telles que l'étoile (Y) ou le triangle (Δ), s'adaptent aux exigences spécifiques du réseau (ex. : Δ - Δ ou Y-Y). Indispensables à la gestion des réseaux de transport, ces dispositifs assurent la conversion et l'aiguillage du flux électrique depuis les lignes de haute tension jusqu'aux infrastructures résidentielles et commerciales [24, 25]. Omniprésents dans le milieu industriel où le courant triphasé prédomine, ces appareils sont déployés stratégiquement à chaque nœud

du réseau : des centrales de production aux postes d'interconnexion et de distribution, jusqu'aux installations sur poteaux ou au sein des zones de distribution locale.

1.1.5 Contextes d'utilisation des transformateurs

Le transformateur électrique est le composant pivot de la société moderne, assurant l'interface entre la production d'énergie et ses multiples usages. Sa polyvalence repose sur sa capacité à ajuster les paramètres de tension et d'intensité pour répondre aux contraintes spécifiques de chaque secteur d'activité [16].

1.1.5.1 Réseaux électriques de transport et d'interconnexion

Le réseau électrique constitue l'infrastructure critique permettant le transit de l'énergie des centres de production vers les points de consommation. Les transformateurs y jouent un rôle de régulateurs dynamiques, facilitant le changement de tension au sein des postes électriques pour garantir la stabilité globale du système. Ces équipements permettent de segmenter le réseau en différents niveaux de tension, optimisant ainsi la gestion des flux et la protection contre les courants de défaut [14, 26].

1.1.5.2 Production et transport de l'énergie électrique

En sortie des centrales, les **transformateurs élévateurs** augmentent la tension pour abaisser proportionnellement l'intensité. Cette manœuvre est une nécessité économique et physique : en réduisant le courant, on minimise les pertes par effet Joule et on limite les chutes de tension sur les longues distances. Dans les réseaux de transport, les transformateurs d'interconnexion permettent ensuite d'adapter les différents paliers de haute tension entre les régions, assurant une répartition fluide de la puissance [26].

1.1.5.3 Réseaux de distribution électrique

Ce domaine assure la liaison finale vers l'utilisateur. Les transformateurs abaisseurs de distribution convertissent la moyenne tension (HTA) en basse tension (BT) utilisable par les

consommateurs. Selon les standards de la CEI, ces unités sont conçues pour supporter des charges cycliques et des environnements climatiques variés, tout en fournissant une tension stabilisée malgré les fluctuations du réseau de transport [14].

1.1.5.4 Autres applications

- Dans le secteur des télécommunications, les transformateurs assurent une isolation galvanique et une régulation fine pour protéger les circuits électroniques sensibles.) [19, 27].
- Les transformateurs d'éclairage sont essentiels pour réguler la sortie vers des dispositifs nécessitant des tensions spécifiques (12V/24V), indépendamment des variations d'entrée. [27, 28].
- Le fonctionnement des moteurs électriques est une extension directe des principes du transformateur, les deux reposant sur la loi de Faraday sur l'induction. Dans l'industrie, les transformateurs adaptent la puissance pour des machines lourdes et des processus complexes. Ils agissent également comme des filtres, protégeant les moteurs des perturbations électriques et des harmoniques générés par les variateurs de vitesse [16, 19]. La figure 1-3 ci-dessous montre la Modernisation du réseau électrique.

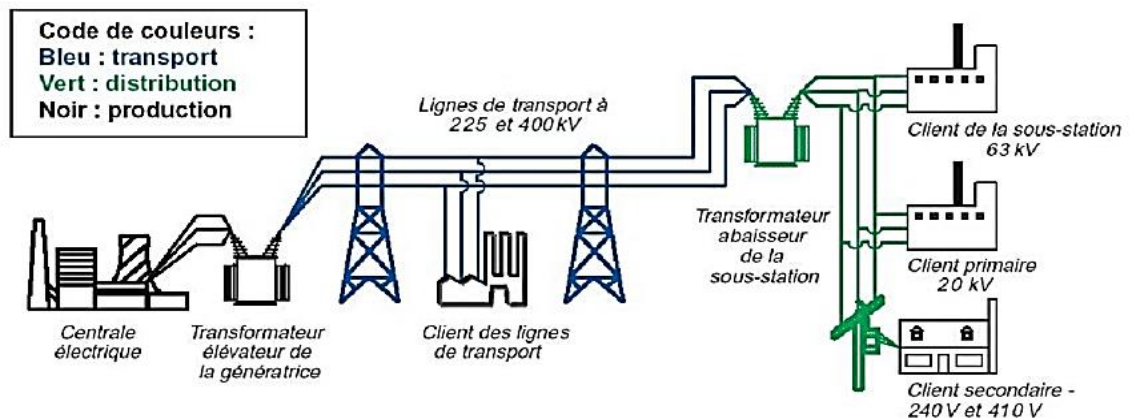


Figure 1-3 Modernisation du réseau électrique [29]

1.1.6 Pannes et défauts courants

L'analyse de la fiabilité des transformateurs de distribution révèle que, bien que ces machines soient dépourvues de pièces mobiles, elles restent vulnérables à des contraintes physiques sévères. Les défaillances peuvent être classées selon les mécanismes suivants :

1.1.6.1 Surcharges thermiques et vieillissement accéléré

Constituent la cause prépondérante du vieillissement prématuré. En zone urbaine dense, le fonctionnement au-delà de la puissance nominale génère une augmentation quadratique des pertes par effet Joule, entraînant une élévation critique de la température du point chaud (Hotspot). Selon la norme IEEE C57.91 [30], le papier isolant (cellulose) subit alors une dépolymérisation chimique accélérée. On estime qu'une augmentation de seulement 6°C au-dessus de la température de référence peut doubler la vitesse de dégradation de l'isolant, réduisant ainsi drastiquement l'espérance de vie du transformateur, initialement prévue pour 20 ou 30 ans.

1.1.6.2 Court-circuit

Représentent des chocs brutaux, qu'ils soient internes (entre spires) ou externes (sur les lignes). Ces événements génèrent des courants de défaut massifs qui induisent des forces électrodynamiques colossales. Si l'isolant cellulosique est déjà fragilisé par une surchauffe chronique, il perd son élasticité et sa résistance mécanique. Sous l'effet des forces de Laplace, les enroulements se déforment axialement et radialement, provoquant une rupture définitive de la barrière isolante et conduisant souvent à un incendie ou une explosion interne de la cuve [26].

1.1.6.3 Fuites d'huile et la contamination diélectrique

Altèrent les capacités de refroidissement et d'isolation. L'huile minérale, régie par la norme CEI 60422 [31], doit conserver une rigidité diélectrique élevée. Une fuite au niveau des joints ou des radiateurs abaisse le niveau du fluide, exposant les parties actives à l'humidité et à l'oxygène. Cette contamination, même minime (quelques parties par million d'eau), réduit drastiquement la tension de claquage de l'huile. Sans un refroidissement adéquat assuré par la circulation de l'huile, le transformateur entre dans un cycle de surchauffe irréversible, même lorsqu'il est exploité à sa charge nominale.

1.2 Étude et maintenance des équipements

La pérennité d'un réseau électrique dépend intrinsèquement de la qualité de la maintenance appliquée à ses composants les plus critiques, à savoir les transformateurs de distribution. L'étude des stratégies de maintenance révèle une évolution constante, passant d'une gestion réactive à une gestion proactive. L'objectif fondamental est de trouver l'équilibre entre la réduction des coûts opérationnels et la maximisation de la disponibilité de l'énergie, particulièrement dans des contextes de forte sollicitation comme celui de la SNEL.

De nos jours, on distingue principalement trois stratégies de maintenance, chacune définie par son mode d'intervention :

1.2.1 La maintenance corrective (ou curative)

Cette méthode consiste à intervenir uniquement après la survenance d'une panne ou d'un déclenchement accidentel. Bien qu'elle ne nécessite aucune planification préalable, elle s'avère la plus coûteuse pour la société. Les conséquences directes incluent des interruptions de service prolongées et une dégradation irréversible des composants internes du transformateur, conduisant souvent à un remplacement prématuré de l'équipement [32].

1.2.2 La maintenance préventive systématique

Elle repose sur des interventions planifiées à intervalles réguliers (inspections visuelles, serrages, prélèvements d'huile), indépendamment de l'état réel de l'appareil. Bien qu'efficace pour prévenir les défauts mineurs, elle présente des limites majeures : elle ne peut détecter une dégradation thermique soudaine due à une surcharge imprévue survenant entre deux cycles de maintenance. Une grande partie des défaillances graves surviennent de manière aléatoire malgré un suivi systématique [33].

1.2.3 La maintenance prédictive (ou conditionnelle)

C'est l'approche la plus avancée et celle sur laquelle se base notre étude IoT. Elle s'appuie sur la surveillance continue des paramètres vitaux de la machine, tels que la charge et la température. En intégrant ces données dans des modèles mathématiques rigoureux définis par les normes IEEE C57.91 et CEI 60076-7, cette stratégie permet de calculer en temps réel le taux de vieillissement de l'isolant. Cela offre à l'exploitant la capacité d'intervenir "juste à temps", prolongeant ainsi la durée de vie résiduelle de l'équipement de manière significative [30, 34].

L'étude de ces méthodes montre que seule la maintenance prédictive, soutenue par des technologies de monitoring en temps réel, permet de répondre efficacement aux défis de surcharge rencontrés dans les zones urbaines denses.

1.2.4 Importance de la maintenance prédictive pour les transformateurs

La maintenance prédictive représente un changement de paradigme dans la gestion des actifs électriques. Contrairement aux approches traditionnelles qui subissent la panne ou gaspillent des ressources dans des inspections inutiles, la maintenance prédictive utilise la donnée pour transformer une mesure physique en décision stratégique. Pour un transformateur de distribution, son importance peut être résumée à travers les points suivants :

- **Optimisation de la durée de vie résiduelle :** En surveillant en temps réel la température du point chaud, le système permet d'éviter les épisodes de surchauffe qui dégradent de manière irréversible le papier isolant. Selon la norme IEEE C57.91, une gestion prédictive peut prolonger la vie d'un transformateur de plusieurs années en limitant le taux de perte de vie quotidien [30].
- **Réduction des coûts d'exploitation :** La maintenance prédictive permet de passer d'une maintenance "au calendrier" à une maintenance "au besoin". Cela réduit les déplacements inutiles des équipes techniques et évite les réparations d'urgence suite à des explosions ou des incendies, qui coûtent jusqu'à 10 fois plus cher qu'une intervention préventive [24].
- **Amélioration de la qualité de service :** Pour la SNEL, l'importance est aussi sociale. En anticipant les défaillances, on réduit le nombre et la durée des coupures d'électricité (black-out) dans les zones urbaines denses. Cela garantit une meilleure stabilité du réseau et une satisfaction accrue des abonnés.

- **Aide à la décision basée sur les données :** L'utilisation de l'IoT permet de collecter un historique de données (Big Data). Cet historique aide les ingénieurs à identifier quels transformateurs sont sous-exploités et lesquels sont surchargés, permettant ainsi une meilleure planification des extensions de réseau. La figure 1-4 ci-dessous montre Comparaison des processus décisionnels des stratégies de maintenance.

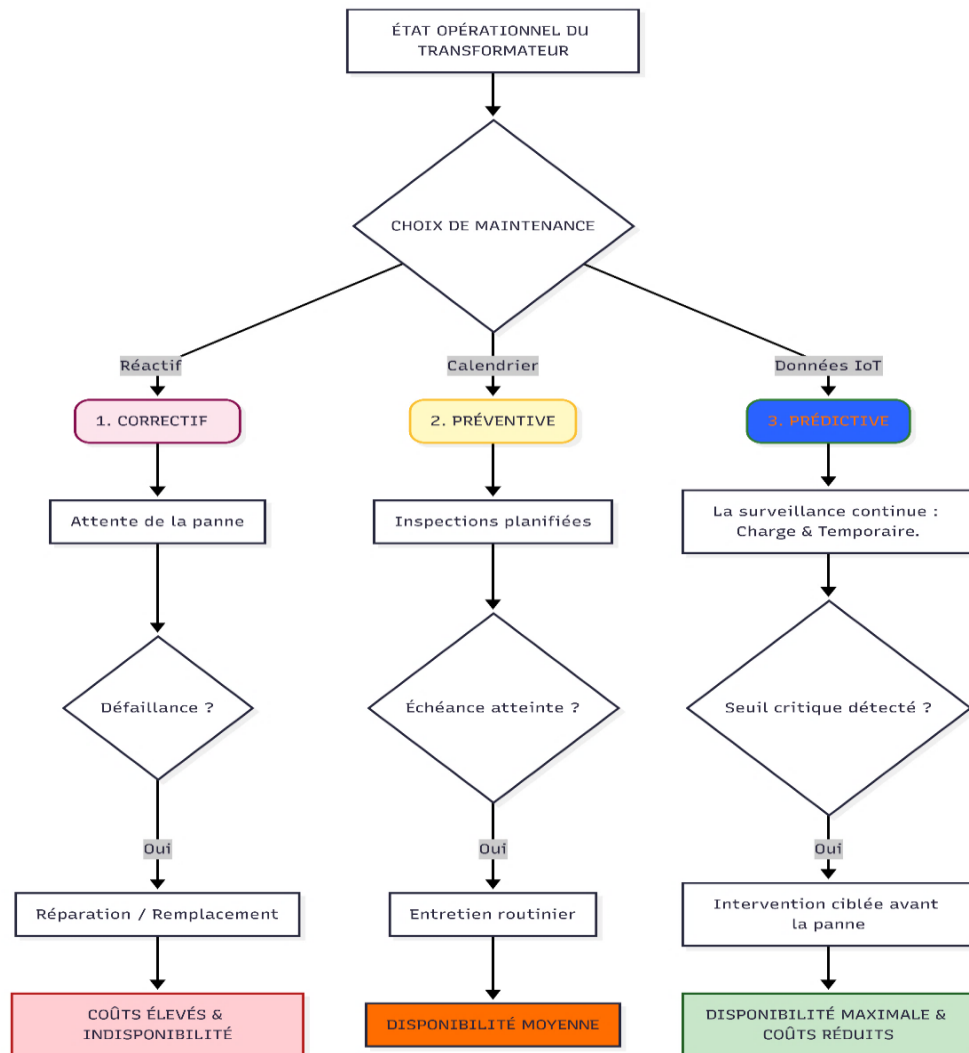


Figure 1-4 Comparaison des processus décisionnels des stratégies de maintenance.

1.3 La technologie IOT (Internet of Things)

L'évolution constante des réseaux électriques vers le concept de Smart Grid (réseau intelligent) impose une visibilité accrue sur l'état des équipements de distribution. Traditionnellement, les transformateurs étaient des actifs "aveugles", dont l'état n'était connu qu'en cas d'avarie ou lors d'inspections manuelles sporadiques. L'émergence des technologies de l'information et de la communication, particulièrement de l'Internet des Objets (IoT), offre désormais la possibilité d'intégrer une intelligence décentralisée au cœur même du réseau. Cette transition numérique permet de collecter, de transmettre et d'analyser des données massives pour transformer la gestion de l'énergie en un système proactif et communicant.

1.3.1 Définition

L'Internet des Objets (*Internet of Things*) représente une extension d'Internet à des choses et à des lieux du monde physique. Il se définit comme une infrastructure réseau mondiale reliant des objets physiques et virtuels grâce à des capacités de capture de données et de communication [35].

Selon l'Union Internationale des Télécommunications (**UIT-T**), l'IoT est une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de fournir des services avancés en interconnectant des objets grâce à des technologies de communication existantes et évolutives [36]. Dans le cadre de ce projet, l'IoT repose sur trois piliers conceptuels fondamentaux :

- **La Perception (Sensing)** : L'usage de capteurs électroniques pour traduire des grandeurs physiques (température, intensité) en données numériques.
- **La Connectivité** : L'acheminement de ces données via des protocoles réseaux vers une plateforme de traitement [37]

- **L'Intelligence de service :** La conversion des données brutes en informations exploitables (alertes, courbes de charge) pour l'aide à la décision.

1.3.2 Architecture du système de monitoring par IoT

L'architecture d'un système de surveillance par l'Internet des Objets ne doit pas être perçue comme un simple assemblage de composants, mais comme un flux continu d'informations structuré en couches fonctionnelles. Cette organisation garantit que la donnée physique captée sur le transformateur se transforme en une décision de maintenance pertinente [38].

1.3.2.1 Le niveau d'acquisition (Couche de perception)

À ce premier niveau, le système joue le rôle d'organe sensoriel. Il s'agit d'équiper le transformateur de dispositifs capables de "ressentir" son état interne. Cette étape décrit comment des capteurs spécialisés surveille en permanence les signes vitaux de l'appareil, tels que l'élévation thermique ou les variations de la charge électrique. Selon [39], cette couche est responsable de la conversion des phénomènes physiques du monde réel en signaux numériques traitables par l'intelligence électronique.

1.3.2.2 Le niveau de transport (Couche de liaison)

Une fois les données recueillies, elles doivent être acheminées vers les centres de décision. Cette étape assure le pont entre le site physique (le poste de transformation de la SNEL) et le monde numérique. L'importance de ce niveau réside dans sa capacité à briser l'isolement des équipements. L'information voyage à travers les infrastructures de télécommunication, permettant de centraliser la surveillance de plusieurs actifs dispersés géographiquement, garantissant ainsi une "ubiquité" de l'information [40].

1.3.2.3 Le niveau de supervision (Couche d'application)

C'est le sommet de l'architecture, là où la donnée brute acquiert sa valeur d'usage. Ce niveau traite les informations reçues pour les rendre intelligibles. À travers des interfaces visuelles, le système traduit les chiffres en courbes de tendance et en indicateurs d'état de santé (*Health Index*). C'est également à ce stade que l'intelligence du système se manifeste par le déclenchement d'alertes, transformant une simple mesure en une action de maintenance proactive [41]. La figure 1-5 ci-dessous montre l'architecture IoT.

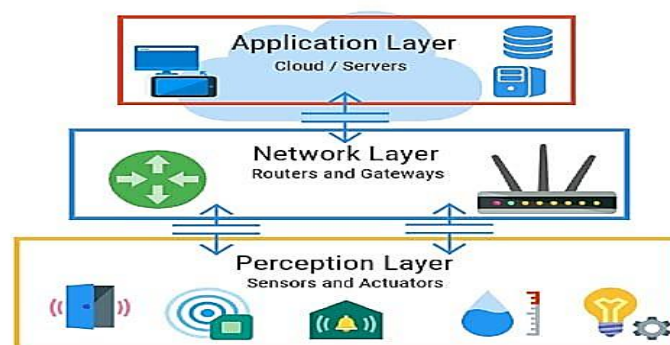


Figure 1-5 IoT Architecture [42].

1.3.3 Capteurs dans l'écosystème IoT industriel

Les capteurs peuvent être classés en trois catégories fondamentales : électriques, thermiques et physico-chimiques :

1.3.3.1 Acquisition des Grandeurs Électriques

La surveillance des paramètres électriques est le premier indicateur de la santé d'un réseau de distribution.

- **Transformateurs de Courant (TC) à Noyau Ouvrant** : Ces capteurs, comme le modèle SCT-013, fonctionnent sur le principe de l'induction électromagnétique de

Faraday. Ils permettent une mesure de l'intensité sans rupture de la continuité de service [43].

- **Capteurs à Effet Hall** : Contrairement aux TC, ils utilisent la tension de Hall pour mesurer des courants AC et DC. Ils offrent une linéarité supérieure et une réponse en fréquence plus large, bien qu'ils nécessitent une alimentation externe constante [44].
- **Transformateurs de Potentiel (TP) de précision** : Utilisés pour la mesure de tension (ex : ZMPT101B), ils assurent l'isolation galvanique entre la haute tension et le microcontrôleur tout en permettant le calcul de la puissance active et du facteur de puissance [45].

1.3.3.2 Monitoring Thermique et Environnemental

La température est le facteur le plus critique influençant la dégradation de l'isolation cellulosique (papier) et de l'huile diélectrique.

- **Sondes Numériques (Protocole 1-Wire)** : Le DS18B20 est privilégié dans les architectures IoT décentralisées. Son interface numérique immunise la donnée contre les bruits électromagnétiques (EMI) générés par le transformateur [46].
- **Thermocouples (Type K, J)** : Adaptés aux températures extrêmes, ils reposent sur l'effet Seebeck. Cependant, ils nécessitent un conditionnement de signal complexe (amplification et compensation de soudure froide) via des circuits intégrés comme le MAX6675 [47].
- **Capteurs d'Humidité Relative (HR)** : La présence d'humidité dans les armoires de commande ou dans l'huile (mesurée par activité de l'eau) est un vecteur de court-circuit et de réduction de la rigidité diélectrique [48].

1.3.4 Écosystème des protocoles de communication IoT

Le choix d'un protocole de communication est déterminé par l'architecture du réseau de monitoring. On distingue généralement les réseaux de proximité (PAN), les réseaux locaux (LAN) et les réseaux étendus (WAN).

1.3.4.1 Protocoles de proximité et réseaux maillés (Courte portée)

Ces protocoles sont essentiels pour la maintenance locale et la communication inter-capteurs.

- **Bluetooth Low Energy (BLE)** : Le BLE (IEEE 802.15.1) n'est pas une simple évolution du Bluetooth classique, mais une architecture optimisée pour la transmission de petits paquets de données avec une consommation d'énergie extrêmement faible. Le BLE opère dans la bande ISM de 2,4 GHz mais utilise 40 canaux de 2 MHz (contre 79 canaux de 1 MHz pour le Bluetooth classique). Il utilise un mécanisme de "Fast Connection" qui permet d'envoyer des données en quelques millisecondes, puis de retourner immédiatement en mode veille profonde (*Deep Sleep*) [49].
- **Zigbee** : Zigbee est conçu pour les réseaux de capteurs où la fiabilité du lien est plus importante que le débit. Sa force réside dans sa couche réseau capable de gérer l'auto-cicatrisation (*Self-Healing*). Si un nœud tombe en panne, le message trouve automatiquement un autre chemin à travers les routeurs du réseau pour atteindre la passerelle. Il supporte jusqu'à 65 000 nœuds dans un seul réseau [50].
- **Wi-Fi** : Le Wi-Fi est le protocole de réseau local le plus répandu, offrant une intégration native avec les infrastructures internet. Bien qu'offrant des débits très élevés (plusieurs Mb/s), il souffre d'une consommation énergétique importante due à la gestion complexe de sa pile TCP/IP. Sa portée est limitée par les obstacles physiques et les interférences dans la bande de 2,4 GHz, très saturée [51].

1.3.4.2 Réseaux Étendus à Basse Consommation (LPWAN)

Pour la remontée des données vers un serveur central situé à plusieurs kilomètres avec une puissance d'émission inférieure à celle d'une ampoule LED, deux technologies prédominent

- **LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)** : LoRaWAN repose sur la modulation LoRa, une technique d'étalement de spectre, Sa particularité réside dans sa robustesse face aux interférences et sa capacité à décoder des signaux sous le niveau du bruit thermique. Il opère sur des fréquences libres (868 MHz en Afrique), ce qui permet à la SNEL de déployer son propre réseau privé sans payer de frais d'abonnement aux opérateurs télécoms, grâce aux basses fréquences, le signal traverse efficacement les parois des bâtiments et les structures métalliques des postes électriques [52].
- **Sigfox** : Contrairement à LoRa, Sigfox utilise une technologie Ultra-Narrow Band (UNB). Il envoie des messages extrêmement courts (12 octets) sur une bande très étroite. Cela permet une efficacité énergétique maximale, mais au prix d'un nombre de messages limité par jour (max 140) [52].

1.3.4.3 Technologies cellulaires dédiées à l'IoT (3gpp)

Face à la montée du LPWAN, les opérateurs mobiles ont adapté leurs réseaux pour supporter des millions d'objets connectés sans saturer les cellules utilisées par les smartphones.

- **NB-IoT (Narrowband IoT)** : Le NB-IoT (LTE Cat-NB1) est une norme de la 3GPP qui s'intègre dans le spectre LTE existant. Il occupe une largeur de bande de seulement 180 kHz. Sa force principale est le gain de couplage (MCL) qui est supérieur de 20 dB par rapport au GSM classique. Cela signifie qu'il capte là où un téléphone normal n'a plus de réseau (sous-sols, zones rurales denses), Il bénéficie de la sécurité de niveau opérateur (chiffrement SIM) [53].

- **LTE-M (Long Term Evolution for Machines)** : Aussi appelé eMTC, il est plus puissant que le NB-IoT. Le LTE-M opère sur une bande de fréquence de 1,4 MHz, ce qui lui permet d'atteindre des débits montants et descendants allant jusqu'à 1 Mbps. Il offre une latence beaucoup plus faible (10 à 15 ms) que le NB-IoT. Mobilité et Handover C'est l'un de ses plus grands atouts. Le LTE-M supporte le "Handover" : si un équipement se déplace (ex : un camion de maintenance), la connexion passe d'une antenne relais à une autre sans coupure de session [54]. La figure 1-6 ci-dessous montre les Protocoles de réseau IoT sans fil.

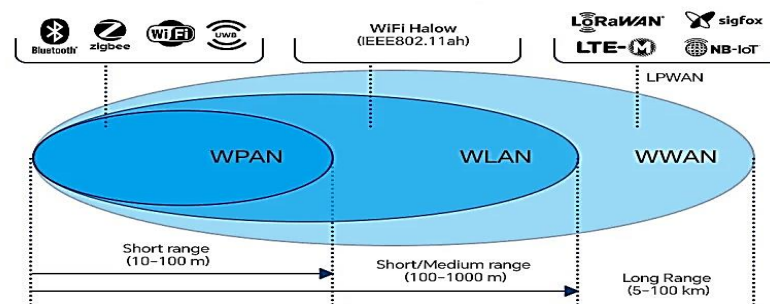


Figure 1-6 Protocoles de réseau IoT sans fil [55].

1.3.5 Protocoles de Couche Application

Une fois la connexion établie, ces protocoles définissent comment les données sont emballées, représentent l'intelligence logicielle qui régit l'échange des données entre les capteurs sur le terrain et le serveur central.

1.3.5.1 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

S'impose comme le standard industriel pour cette architecture. Reposant sur un modèle de publication/abonnement, il permet au capteur du transformateur de "publier" ses mesures sur un sujet spécifique (*topic*) vers un serveur intermédiaire appelé Broker.

Ce mécanisme est extrêmement léger car il réduit la taille des en-têtes de paquets au strict minimum, limitant ainsi la consommation de data et d'énergie. Sa force réside également dans sa gestion de la Qualité de Service (QoS), qui permet de garantir, selon l'importance de la donnée, que le message soit délivré "au moins une fois" ou "exactement une fois", assurant ainsi une fiabilité totale pour les rapports d'incidents [56].

1.3.5.2 CoAP (Constrained Application Protocol)

Propose une approche différente. Conçu comme une version optimisée du HTTP, il utilise le mode de transfert UDP plutôt que le TCP utilisé par MQTT. Cela permet d'éliminer la phase lourde d'établissement de connexion, rendant CoAP idéal pour des capteurs qui doivent envoyer une alerte instantanée avant de retomber immédiatement en mode de veille profonde [57].

1.3.5.3 Http/Https

Bien que trop gourmand pour les capteurs eux-mêmes, reste indispensable au niveau de la couche supérieure pour permettre aux ingénieurs de consulter les tableaux de bord et de visualiser les graphiques de performance via une interface web sécurisée [58].

1.3.6 Couche de traitement des données et prise de décision

Le traitement des données constitue l'intelligence centrale du système de monitoring. Une fois les mesures (courant, température, gaz) acheminées par les protocoles LoRaWAN ou LTE-M, elles sont accueillies par un Broker MQTT qui assure la distribution des flux. Ces données sont ensuite injectées dans une base de données orientée séries temporelles (Time-Series Database), telle qu'InfluxDB, permettant un stockage optimisé des mesures horodatées. Cette étape de stockage est cruciale pour l'analyse historique, car elle permet de comparer les performances actuelles du transformateur avec ses états passés afin d'identifier toute dérive comportementale suspecte [59].

Parallèlement au stockage, une phase d'analyse en temps réel est opérée via le Cloud Computing ou l'Edge Computing. Le système applique des algorithmes d'aide à la décision basés sur des modèles physiques ou mathématiques. Par exemple, le modèle thermique de la norme IEEE C57.91 est utilisé pour calculer la température du "point chaud" (*Hot-spot*) de l'enroulement, une variable impossible à mesurer directement mais essentielle pour estimer le vieillissement de l'isolant. Dans certains cas, une logique floue (*Fuzzy Logic*) est implémentée pour croiser plusieurs variables (ex : une hausse de température combinée à une détection de gaz) afin de définir un Indice de Santé (Health Index) global du transformateur [60,62].

- Enfin, la prise de décision se matérialise à travers une interface de supervision (Dashboard). Si un algorithme détecte un dépassement de seuil critique ou une anomalie prédictive, le système déclenche une action immédiate : soit l'envoi d'une alerte prioritaire aux équipes de maintenance via SMS ou application mobile, soit, dans les systèmes les plus avancés, la commande automatique d'un disjoncteur pour protéger l'équipement d'une destruction imminente. Cette transition de la maintenance curative vers la maintenance préventive et prédictive est le bénéfice majeur de l'architecture IoT [61]. La figure 1-7 ci-dessous montre l'architecture logique et flux de données de la couche application.

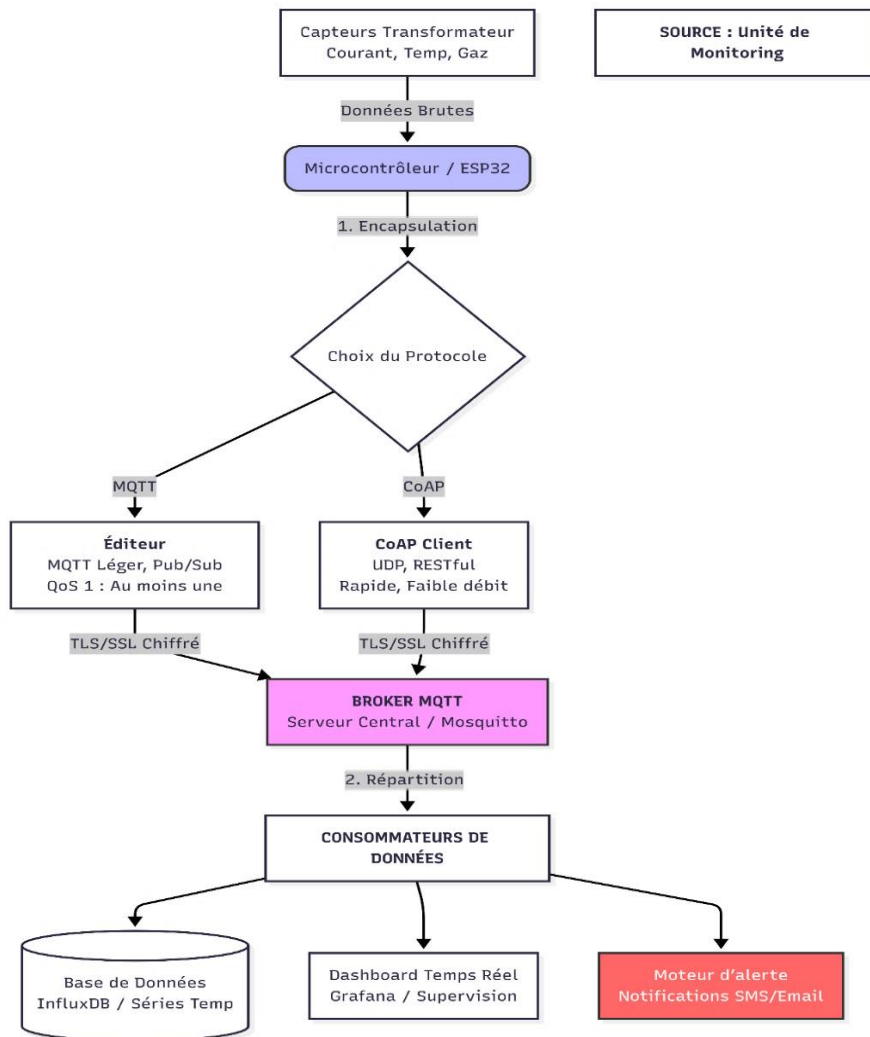


Figure 1-7 Architecture logique et flux de données de la couche application

1.3.7 Domaines d'application de l'IoT

L'Internet des Objets (IoT) s'est imposé comme une technologie transversale capable de transformer radicalement la gestion des infrastructures modernes. Son champ d'application est vaste, touchant d'abord le quotidien à travers la domotique, où il permet une gestion intelligente des bâtiments pour optimiser le confort et la consommation énergétique [62]. Dans le secteur

de la santé, l'IoT révolutionne le suivi médical grâce à des dispositifs connectés qui assurent une surveillance constante des patients à distance, permettant ainsi des interventions plus rapides en cas d'anomalie [63].

Au-delà des usages domestiques ou médicaux, l'IoT joue un rôle moteur dans l'industrie 4.0. Il permet de connecter les machines de production à des systèmes d'analyse centrale, facilitant la maintenance prédictive et réduisant ainsi les arrêts techniques coûteux [64]. Dans le cadre des villes intelligentes (Smart Cities), cette technologie aide à réguler le trafic urbain, à gérer l'éclairage public de manière autonome et à surveiller la qualité de l'environnement, rendant les centres urbains plus durables et mieux organisés [65].

Cependant, c'est dans le secteur de l'énergie et des réseaux électriques intelligents (Smart Grids) que l'IoT révèle tout son potentiel. En intégrant des capteurs sur le réseau de distribution, l'IoT permet de passer d'un réseau passif à un réseau intelligent capable d'autodiagnostic [66]. Dans ce contexte, l'application de l'IoT au monitoring des transformateurs de puissance permet d'anticiper les défaillances critiques, d'optimiser la charge et de prolonger la durée de vie des équipements grâce à une remontée d'informations précise et instantanée [67].

1.4 Conclusion partielle

En définitive, l'analyse des technologies IoT et des protocoles de communication démontre que la survie du transformateur de distribution dépend désormais de sa capacité à être "connecté". L'architecture étudiée dans ce chapitre permet de passer d'un équipement passif à un système intelligent capable de signaler ses propres faiblesses avant qu'une panne majeure ne survienne. En maîtrisant le flux de données, depuis les mesures physiques sur les enroulements jusqu'à l'analyse décisionnelle, nous posons les jalons d'une gestion proactive qui optimise la durée de vie de ces actifs critiques pour la SNEL.

Chapitre 2

Etude technique et modélisation du système de surveillance d'un transformateur

2.1 Introduction

Ce chapitre constitue le pivot technique de notre travail, marquant la transition entre l'étude conceptuelle et la réalisation concrète. Il est consacré à l'étude technique et à la Modélisation du système de surveillance, une phase essentielle pour structurer l'architecture de notre solution de monitoring.

2.2 Étude technique des composants du système

Dans un premier temps, nous définirons l'architecture globale du système avant de détailler le choix des composants matériels. Cette sélection inclut le microcontrôleur central ainsi que les capteurs utilisés. Enfin, nous présenterons la configuration de l'environnement de simulation sous Proteus et du plateforme IoT Blynk. Cette approche nous permettra de valider virtuellement le traitement des données et l'interface de supervision mobile avant de procéder à l'implémentation du prototype physique.

2.2.1 Architecture globale du système

L'architecture de notre solution de monitoring est conçue selon une structure modulaire, organisée pour garantir une fluidité totale dans la circulation de l'information, depuis le transformateur jusqu'à l'utilisateur final. Cette organisation s'articule autour de trois niveaux fonctionnels complémentaires qui assurent la capture, le traitement et la supervision des données en temps réel. La figure 2-1 ci-dessous montre l'architecture globale du système.

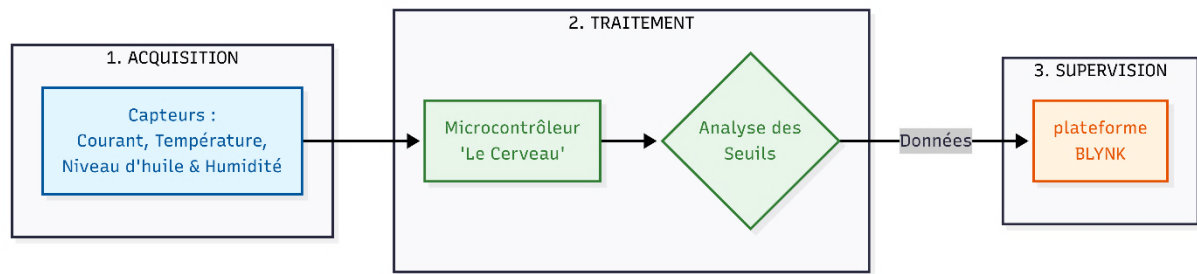


Figure 2-1 Architecture globale du système

2.2.1.1 Le Niveau de Perception et d'Acquisition

Ce premier niveau constitue l'interface physique entre le système de surveillance et le transformateur de la SNEL. Son rôle principal est de capter les grandeurs analogiques essentielles qui caractérisent l'état de fonctionnement de l'équipement. Les dispositifs de capture convertissent des phénomènes physiques, tels que le flux magnétique issu du courant ou la chaleur dégagée par la cuve, en signaux électriques de faible amplitude. Ces signaux subissent ensuite un conditionnement rigoureux pour être débarrassés des bruits électromagnétiques environnants, fréquents dans les postes de transformation. Cette étape garantit que les informations transmises au bloc suivant sont fidèles à la réalité du terrain et prêtes à être interprétées sans risque d'erreur de mesure.

2.2.1.2 Le Niveau de Traitement et d'Intelligence Embarquée

Le second niveau représente le cœur décisionnel du dispositif, matérialisé par l'unité de microcontrôleur. Ce bloc assure la transformation des signaux électriques reçus en données numériques compréhensibles par l'informatique. Au-delà de la simple conversion, c'est ici que réside la logique de surveillance : le microcontrôleur exécute un programme qui compare en permanence les valeurs de courant et de température aux limites nominales du transformateur. Si une anomalie est détectée, comme une surcharge persistante, l'unité de traitement hiérarchise l'information et prépare l'envoi d'un paquet de données via le module de communication

intégré. Ce niveau sert donc de pont intelligent entre le monde physique et le réseau numérique, assurant la sécurité locale du système tout en gérant les flux de données sortants.

2.2.1.3 Le Niveau de Supervision et de Cloud Computing

Le dernier niveau concerne la couche de visualisation et d'alerte déportée, reposant sur l'écosystème Blynk. Dans notre architecture, ce niveau permet de centraliser les données provenant du transformateur sur un serveur sécurisé accessible via Internet. L'interface utilisateur, configurée virtuellement, traduit les flux de données brutes en indicateurs visuels dynamiques tels que des graphiques de charge, des jauges de température et des historiques d'événements. En plus de la fonction de monitoring constant, ce niveau assure une mission d'alerte proactive. Grâce à la connectivité IoT, il permet de notifier instantanément les techniciens de maintenance sur leurs terminaux mobiles ou ordinateurs dès qu'une situation critique est identifiée, éliminant ainsi les délais liés aux inspections manuelles et facilitant une maintenance préventive efficace.

2.2.2 Choix des composants

Le passage du concept à la simulation virtuelle nécessite une sélection rigoureuse des composants électroniques. Cette section détaille les caractéristiques des dispositifs retenus pour assurer la capture des données et leur traitement centralisé.

2.2.2.1 L'Unité de Traitement Centrale

Le choix de l'unité de traitement est dicté par la nécessité d'intégrer nativement des fonctions de calcul intensif et de connectivité sans fil. Pour ce projet, le module ESP32-WROOM-32 d'Espressif Systems a été sélectionné comme cœur du système de monitoring. Ce SoC (System on Chip) se distingue par son architecture Dual-Core Xtensa® LX6 cadencée à 240 MHz, offrant une puissance de calcul de 600 DMIPS [68]. Cette performance permet une gestion asynchrone : un cœur est dédié à l'acquisition des signaux des capteurs (courant, température,

huile), tandis que le second gère la pile protocolaire Wi-Fi pour la synchronisation avec le serveur Blynk.

Sur le plan technique, les spécificités retenues pour la validation du système sont les suivantes :

- **Conversion Analogique-Numérique (ADC)** : 12 bits de résolution sur 18 canaux, permettant une quantification précise des grandeurs physiques [69].
- **Connectivité** : Module Wi-Fi 802.11 b/g/n intégré (2.4 GHz) assurant la liaison IoT sans matériel additionnel.
- **Mémoire** : 520 Ko de SRAM interne et 4 Mo de mémoire Flash externe pour le stockage du micrologiciel (firmware).
- **Interfaces de communication** : Support des protocoles I2C et SPI pour l'interfaçage des sondes numériques de température et d'humidité [68]. La figure 2-2 ci-dessous montre l'ESP32-WROOM-32.

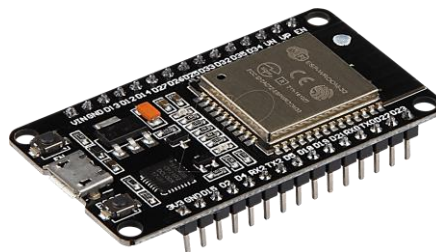


Figure 2-2 ESP32-WROOM-32[70]

2.2.2.2 Dispositifs d'acquisition

Cette section détaille les unités de capture sélectionnées pour traduire les grandeurs physiques du transformateur en données exploitables.

- **Capteur de courant ACS712**

Le choix de l'ACS712 repose sur la technologie de l'effet Hall pour mesurer l'intensité du courant. Contrairement à une résistance de "shunt" qui nécessite un contact direct, l'ACS712 utilise un conducteur en cuivre interne qui génère un champ magnétique proportionnel au courant traversant. Ce champ est converti par un capteur à effet Hall en une tension électrique de faible amplitude [71].

Le modèle 30A possède une sensibilité de 66 mV/A. Pour une lecture précise par l'ESP32, le signal de sortie est centré sur la moitié de la tension d'alimentation ($V^{CC}/2$). En l'absence de courant, la sortie est de 2,5V pour une alimentation de 5V. L'isolation galvanique est ici le point crucial. Elle permet de séparer physiquement la partie "Puissance" du transformateur de la partie "Commande" (ESP32), garantissant qu'une surtension sur le réseau ne détruise pas l'unité de traitement. La figure 2-3 ci-dessous montre le capteur de courant ACS712.

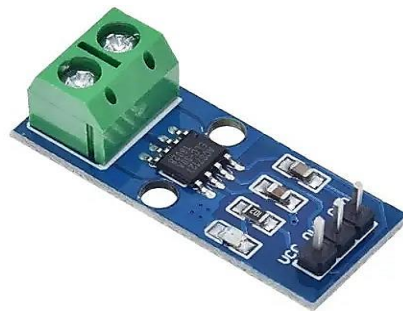


Figure 2-3 Capteur de courant ACS712 [72]

- **Capteur de température DS18B20**

La surveillance thermique du transformateur est confiée à la sonde DS18B20, conçue pour opérer dans des environnements liquides et corrosifs. Le capteur est logé dans un doigt de gant en acier inoxydable, Cette enveloppe assure une étanchéité totale et une excellente conductivité

thermique, tout en protégeant l'électronique interne contre les propriétés chimiques de l'huile diélectrique [73]. Cette sonde utilise le protocole de communication 1-Wire, permettant de véhiculer les données sur un seul conducteur. Chaque sonde possède une adresse série unique de 64 bits, ce qui permet à l'ESP32 d'interroger plusieurs points de mesure sur un bus commun sans risque de confusion [74]. La conversion analogique-numérique se fait à l'intérieur même de l'embout inox avec une résolution allant jusqu'à 12 bits. Cette caractéristique est vitale pour la SNEL, car elle immunise la mesure contre les bruits électromagnétiques intenses générés par le transformateur [75]. La sonde couvre une plage de mesure allant de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Elle est donc capable de détecter le moindre échauffement anormal des enroulements avant que le seuil critique ne soit atteint [76]. La figure 2-4 ci-dessous montre le capteur de température DS18B20.



Figure 2-4 Capteur de température DS18B20 [77]

- **Capteur d'hygrométrie DHT22 / AM2302**

Dans le cadre de ce prototype, le choix s'est porté sur le capteur DHT22. Ce composant est utilisé pour surveiller le taux d'humidité relative, un paramètre critique qui influence directement la rigidité diélectrique de l'isolation du transformateur. L'utilisation de ce capteur est motivée par un impératif économique. Les capteurs industriels certifiés pour une immersion directe dans les fluides diélectriques ont un coût extrêmement élevé. Le DHT22 offre un excellent compromis entre précision et accessibilité financière pour un prototype de monitoring. Il est impératif de préciser que le DHT22 ne doit pas être mis en contact direct

avec l'huile. Son principe de mesure repose sur un substrat capacitif sensible à la vapeur d'eau présente dans l'air ; une immersion saturerait l'élément sensible et rendrait le capteur définitivement hors d'usage [78]. Pour pallier cette contrainte, le capteur est placé dans la partie supérieure du conservateur ou à proximité du respirateur. Il mesure ainsi l'humidité de l'air en contact avec la surface de l'huile, permettant d'anticiper les risques de condensation avant qu'ils n'affectent le diélectrique [79]. Le DHT22 transmet ses données via un signal numérique unique sur 40 bits à l'ESP32. Il offre une plage de mesure de 0 à 100% d'humidité relative avec une précision de $\pm 2\%$, ce qui est suffisant pour détecter une infiltration d'humidité susceptible de dégrader les propriétés isolantes [78]. La figure 2-5 ci-dessous montre le capteur d'hygrométrie DHT22.



Figure 2-5 Capteur d'hygrométrie DHT22 [80]

- **Capteur de niveau de liquide par ultrasons HC-SR04**

Le monitoring de l'intégrité de la cuve est assuré par le capteur à ultrasons HC-SR04. Ce dispositif permet de mesurer en temps réel la distance entre le sommet du conservateur et la surface de l'huile, permettant ainsi de déduire avec précision le volume de liquide restant. Le HC-SR04 fonctionne par temps de vol (Time of Flight). Il émet une salve d'ultrasons à une fréquence de 40 kHz.

L'onde voyage dans l'air, rebondit sur la surface de l'huile et revient vers le récepteur. La distance (d) est calculée par le microcontrôleur ESP32 selon la formule :

$$d = \frac{v \times t}{2}$$

Où v est la vitesse du son dans l'air (≈ 340 m/s) et t temps total aller-retour [81].

Aucun élément métallique ou électrique ne touche l'huile, évitant toute réaction chimique ou risque d'étincelle interne. Contrairement à un simple contacteur de niveau "Haut/Bas", l'ultrason permet de voir la baisse progressive du niveau sur les graphiques Blynk, facilitant la maintenance préventive avant que le seuil critique ne soit atteint. L'absence de pièces mobiles réduit les risques de défaillance mécanique liés à la viscosité de l'huile. La figure 2-6 ci-dessous montre le Capteur ultrasons HC-SR04.

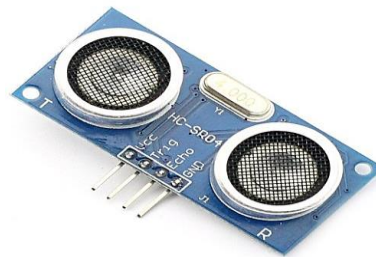


Figure 2-6 Capteur ultrasons HC-SR04 [82]

2.2.2.3 Interface de Visualisation Locale (LCD 16x2 avec Interface I2C)

Pour assurer une lecture directe des données sur site, le système intègre un afficheur à cristaux liquides (LCD) de 16 caractères sur 2 lignes. Afin d'optimiser les ressources du microcontrôleur ESP32, cet écran est couplé à un module de communication I2C (PCF8574).

L'utilisation du protocole I2C (Inter-Integrated Circuit) est ici déterminante. Alors qu'un écran LCD classique nécessite au moins 6 broches de données, la version I2C n'en utilise que deux :

SDA (Serial Data) et SCL (Serial Clock) [83]. Cela libère des entrées/sorties sur l'ESP32 pour d'autres capteurs tout en simplifiant drastiquement le câblage du boîtier de commande. Le rétroéclairage et le contraste sont gérés par le module PCF8574, ce qui permet de maintenir une lisibilité optimale même dans des conditions de faible luminosité (postes de transformation fermés) [84]. Cet écran constitue l'interface homme-machine (IHM) de premier niveau. En cas de perte de connexion Wi-Fi, le technicien de la SNEL conserve un accès visuel complet aux données vitales du transformateur. C'est un gage de sécurité et de continuité de service, transformant le dispositif en un véritable outil de diagnostic de terrain, indépendant du réseau internet. La figure 2-7 ci-dessous montre l'écran LCD 16x2 avec Interface I2C.

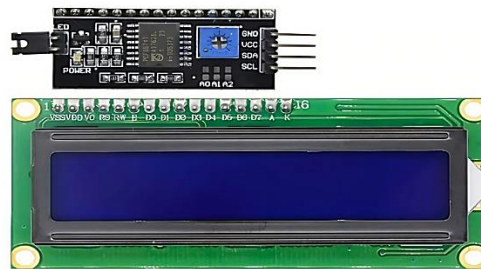


Figure 2-7 Ecran LCD 16x2 avec Interface I2C [85]

2.2.3 Étude logicielle et Environnement de simulation

Cette section présente l'écosystème numérique du projet. Elle détaille les outils de programmation, de validation virtuelle et de supervision cloud nécessaires au traitement et à la transmission des données.

2.2.3.1 Environnement de développement : IDE Arduino

L'**IDE Arduino** (Integrated Development Environment) est la plateforme logicielle choisie pour la conception et le téléversement du micrologiciel (firmware) au sein de l'ESP32.

Cet environnement repose sur une chaîne de compilation croisée basée sur *GCC* (GNU Compiler Collection), adaptée spécifiquement aux architectures des microcontrôleurs modernes comme le processeur Xtensa de l'ESP32 [86].

Le code est rédigé dans un langage basé sur le C/C++, bénéficiant ainsi de la puissance et de la rapidité d'exécution de ces langages de bas niveau, indispensables pour le traitement en temps réel des signaux électriques [87].

L'utilisation de cet IDE permet d'exploiter des bibliothèques de haut niveau, facilitant la gestion des protocoles de communication complexes tels que le 1-Wire pour la sonde DS18B20 ou le Wi-Fi pour la transmission de données [88]. Le logiciel est structuré pour effectuer un échantillonnage précis des capteurs analogiques et numériques, assurant une conversion logicielle des signaux bruts en unités physiques exploitables (Ampères, Degrés, Pourcentage) [61]. Le moniteur série intégré joue un rôle crucial dans la phase de mise au point, permettant d'observer en temps réel le flux de données et de détecter d'éventuelles erreurs de logique avant le déploiement sur site. La figure 2-8 ci-dessous montre l'IDE Arduino.

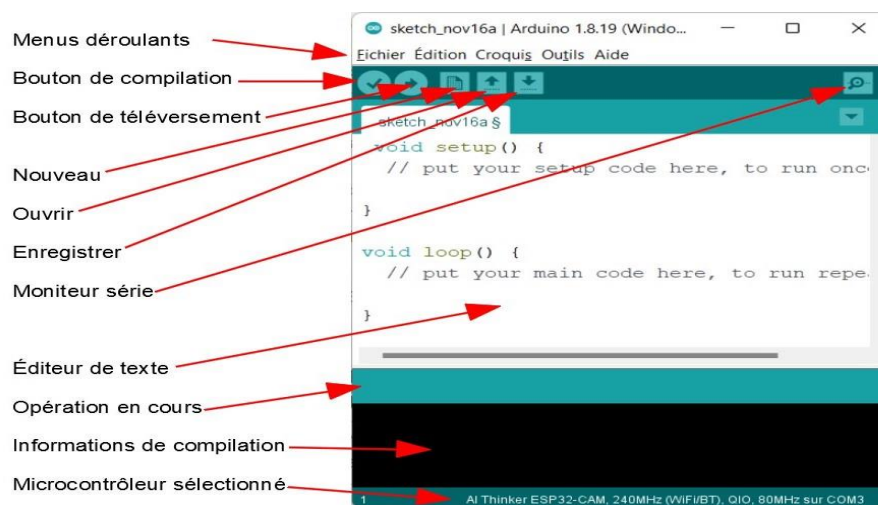


Figure 2-8 IDE Arduino [89]

2.2.3.2 Simulation

Le logiciel **Proteus ISIS** a été utilisé pour la validation partielle de l'architecture électronique du projet. Il convient de souligner une contrainte technique majeure : l'absence de modèle de simulation natif pour l'**ESP32** dans les versions courantes de Proteus.

Proteus a été utilisé exclusivement pour réaliser le schéma de principe (Wiring Diagram). Cette étape permet de cartographier les connexions entre l'ESP32, les capteurs (ACS712, DS18B20, DHT22, HC-SR04) et l'afficheur LCD afin d'éviter les erreurs de câblage lors du montage physique. Pour valider le fonctionnement, un test matériel préliminaire a été effectué sur plaque d'essai avec des composants isolés. Cette approche a permis de vérifier la réaction directe de l'ESP32 face aux signaux réels et de calibrer la sensibilité des capteurs avant l'intégration complète du système. Cette phase de test a également servi à confirmer la capacité de l'ESP32 à interpréter les protocoles numériques (I2C et 1-Wire) et à se connecter au réseau local, des aspects qui ne peuvent être validés par une simple simulation logicielle. La figure 2-9 ci-dessous montre l'Interface Proteus ISIS.

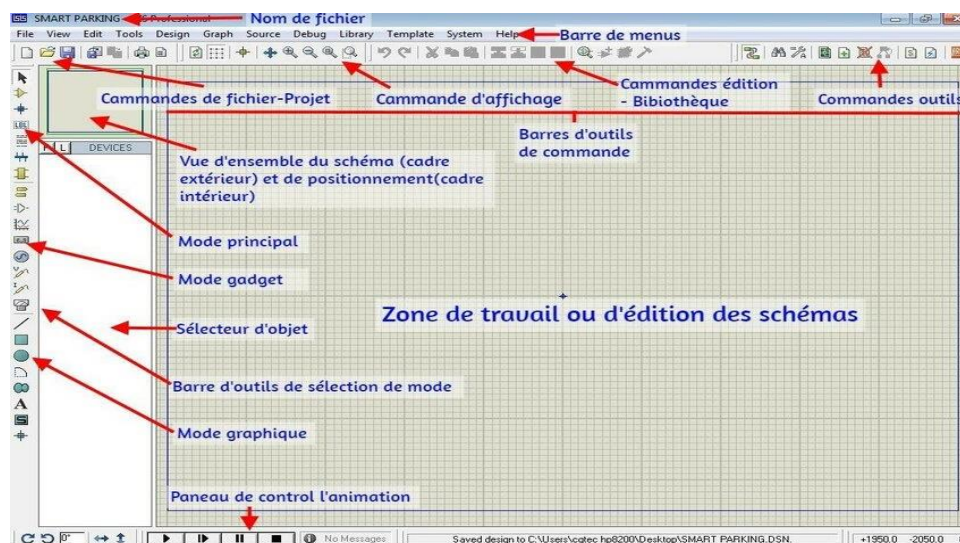


Figure 2-9 Interface Proteus ISIS [90]

2.2.3.3 Interface de Supervision IoT : Plateforme Blynk

La plateforme **Blynk** constitue la couche applicative du projet. Elle assure l'interface entre le système physique et l'utilisateur final en permettant le contrôle et la surveillance à distance via une application mobile ou web.

Le système repose sur une structure tripartite : l'ESP32 (le client), le serveur Cloud Blynk et l'application mobile. La liaison est sécurisée par un jeton d'authentification unique (*Auth Token*) qui garantit que les données du transformateur ne sont accessibles qu'aux agents autorisés [91]. Elle centralise les différents états de santé de l'équipement sur un tableau de bord unique, offrant ainsi une lecture claire et immédiate de la situation opérationnelle sans nécessiter d'analyse complexe de la part de l'utilisateur [61]. La figure 2-10 ci-dessous montre l'Interface Blynk IoT.

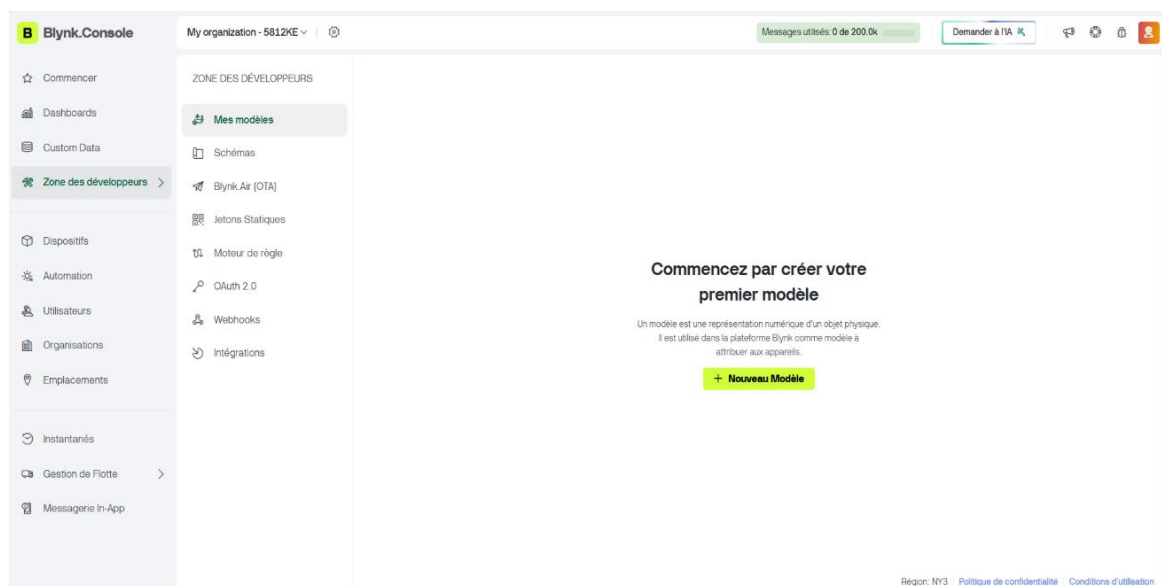


Figure 2-10 Interface Blynk IoT

2.3 Modélisation du système de surveillance

La modélisation constitue l'étape de conception logique qui fait le pont entre les composants individuels et la solution globale. Elle permet de définir l'architecture organique du système, de préciser les interactions entre chaque bloc et d'établir le fonctionnement général du dispositif. Cette approche garantit que le flux d'informations, depuis la capture d'une grandeur physique sur le transformateur jusqu'à sa visualisation finale sur l'interface de supervision, est parfaitement structuré et cohérent.

2.3.1 Fonctionnement général du système

Le fonctionnement du prototype repose sur une boucle de surveillance intelligente et autonome pilotée par le microcontrôleur **ESP32**, qui assure la coordination entre l'acquisition des données et les actions de sécurité. Dès la mise sous tension, le système initialise les capteurs et établit

une connexion Wi-Fi pour la supervision IoT, tout en maintenant le relais **RL1** fermé pour alimenter le secteur. L'acquisition des données s'effectue de manière cyclique : le système surveille en permanence la tension et le courant via le capteur **ACS712**, les conditions environnementales avec le **DHT22**, ainsi que la température et le niveau d'huile grâce aux sondes **DS18B20** et **HC-SR04**. Toutes ces informations sont instantanément traitées par l'ESP32 et comparées à des seuils de sécurité rigoureux.

La protection du transformateur est gérée par une logique d'action immédiate : dès que la température de l'huile franchit le seuil critique de **95°C**, ou si le niveau d'huile chute sous le seuil de **5%**, le microcontrôleur ordonne l'ouverture instantanée du relais **RL1** pour isoler le transformateur. Simultanément, le système déclenche une double alerte : une **alarme sonore locale via un buzzer** et une **notification d'urgence envoyée sur le smartphone** via l'application **Blynk**. Cette même rigueur s'applique aux instabilités électriques (Tension > 110% ou Courant > 105%). Enfin, la supervision est assurée en double interface : un affichage local sur écran **LCD** pour les interventions sur site, et la plateforme **Blynk** qui propose des jauges et des courbes historiques, permettant ainsi au personnel de la SNEL de réagir instantanément, même à distance, pour éviter une détérioration irréversible.

2.3.2 Schéma fonctionnel du système de surveillance

Afin de traduire le principe de fonctionnement en instructions logiques pour le microcontrôleur ESP32, nous avons élaboré Schéma fonctionnel. Cette modélisation permet de visualiser la hiérarchie des tests de sécurité et la simultanéité de la surveillance des différents paramètres (électriques, thermiques et mécaniques). Les figures (2-11 et 2-12) ci-dessous montrent le schéma fonctionnel du système de surveillance et le schéma bloc du système de surveillance

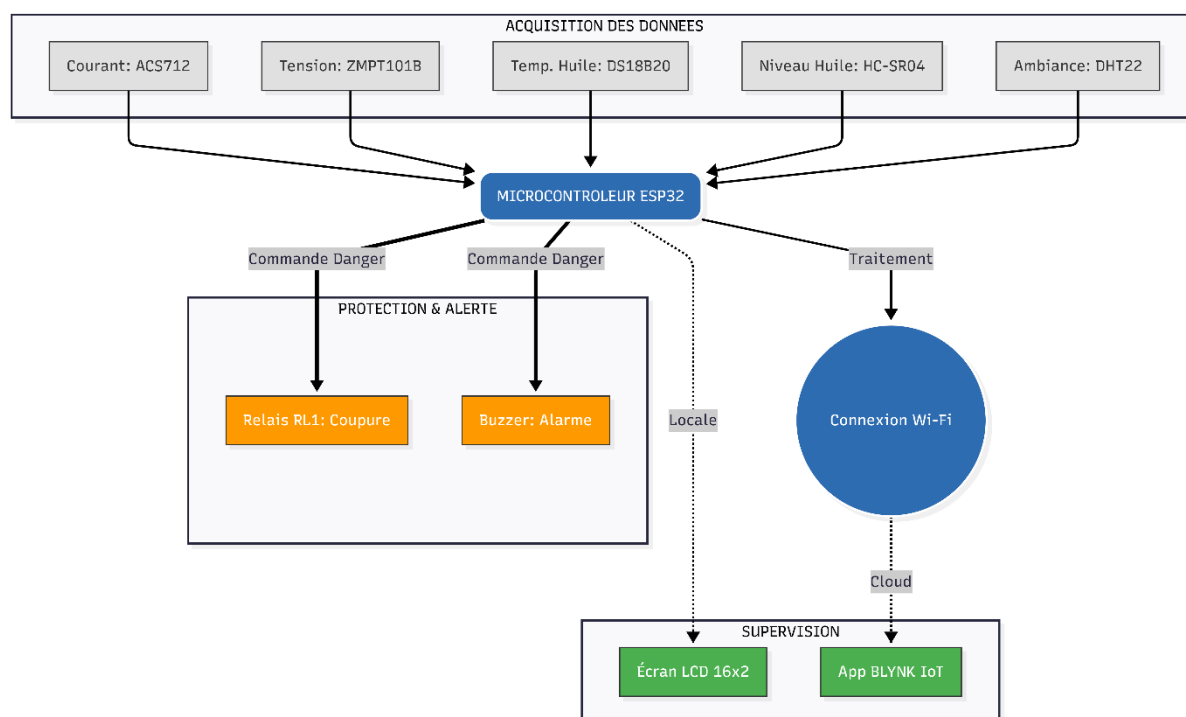


Figure 2-11 Schéma fonctionnel système de surveillance.

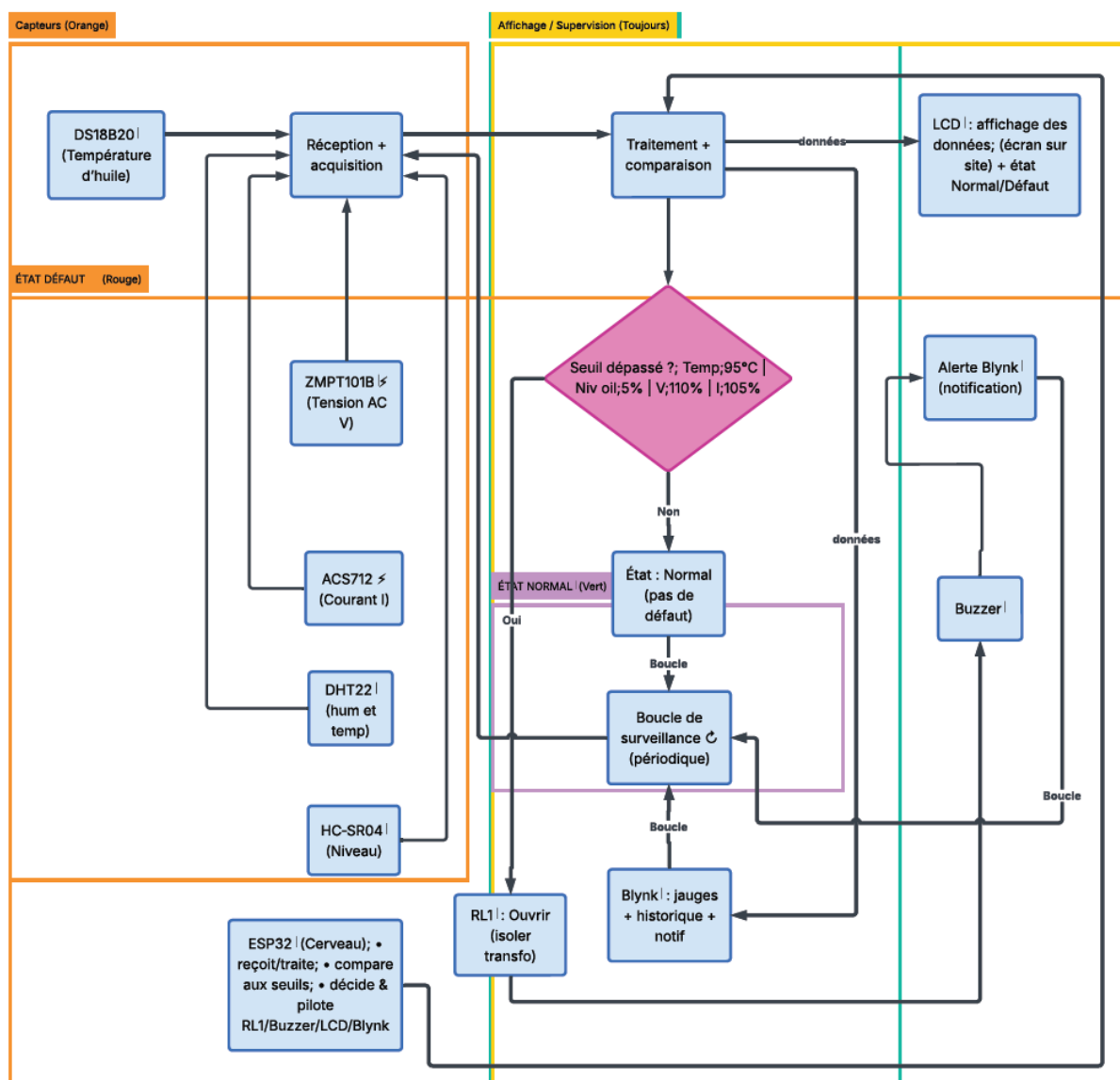


Figure 2-12 Schéma bloc du système de surveillance.

2.3.3 Résultats de la Modélisation Technique

Une fois la modélisation algorithmique établie, il est essentiel de présenter la structure matérielle et numérique du projet. Cette section expose les modèles définitifs de notre solution : d'une part, le modèle électronique conçu sous l'environnement **Proteus**, qui définit l'architecture des composants et leurs interconnexions, et d'autre part, le modèle de supervision **Blynk**, qui constitue l'interface homme-machine (IHM) dédiée à l'agent de maintenance.

2.3.3.1 Modèle Électronique sous Proteus du système de surveillance

La figure 2-13 ci-dessous montre le modèle électronique sous Proteus du système de surveillance.

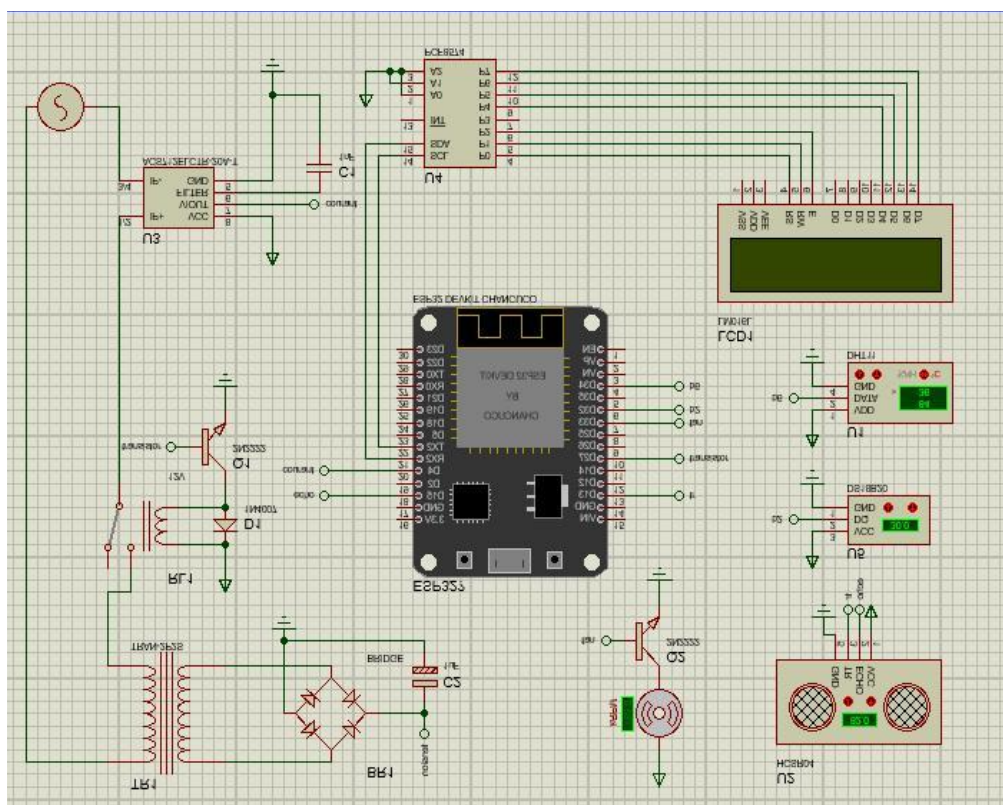


Figure 2-13 Modèle électronique sous Proteus du système de surveillance

Le modèle de simulation présenté (voir Figure 19) illustre l'architecture électronique du système de supervision. Le fonctionnement repose sur une unité centrale de traitement, l'**ESP32**, qui assure l'acquisition des données et le pilotage des actionneurs selon la logique suivante :

Le système surveille en temps réel l'état du transformateur grâce au capteur de courant **ACS712** (U3) pour la charge, à la sonde de température **DS18B20** (U5) pour l'huile, et au capteur ultrasonique **HC-SR04** (U2) pour le niveau de liquide. Un capteur **DHT22** (U1) complète l'analyse en mesurant l'humidité et la température ambiante.

L'ESP32 traite ces signaux analogiques et numériques. Il utilise un module **I2C (PCF8574)** pour piloter l'afficheur **LCD 16x2**, permettant ainsi d'optimiser le nombre de broches utilisées tout en affichant les paramètres locaux (Tension, Courant, Température). L'utilisation du **PCF8574** (le bloc U4 sur ton schéma) est un choix technique intelligent car il permet de piloter l'écran avec seulement 2 fils (SDA/SCL) au lieu de 6 ou 8, ce qui libère des broches sur ton ESP32 pour d'autres fonctions.

En cas de dépassement des seuils critiques, le microcontrôleur commande un **relais (RL1)** via un transistor de commutation (Q1) pour isoler le transformateur du réseau. Parallèlement, un système de refroidissement forcé (ventilateur) est activé via le transistor Q2 pour réguler la température de l'huile.

La partie puissance est simulée par un transformateur (TR1) couplé à un pont de diodes (BR1) pour fournir la tension de référence nécessaire à la surveillance.

2.3.3.2 Modèle de Supervision IoT (Blynk)

Les figures (2-14, 2-15 et 2-16) ci-après représentent les tableaux de bord de supervision développé sur la plateforme Cloud Blynk. Cet outil permet de visualiser en temps réel l'état de santé du transformateur à distance. L'interface se décompose en plusieurs sections :

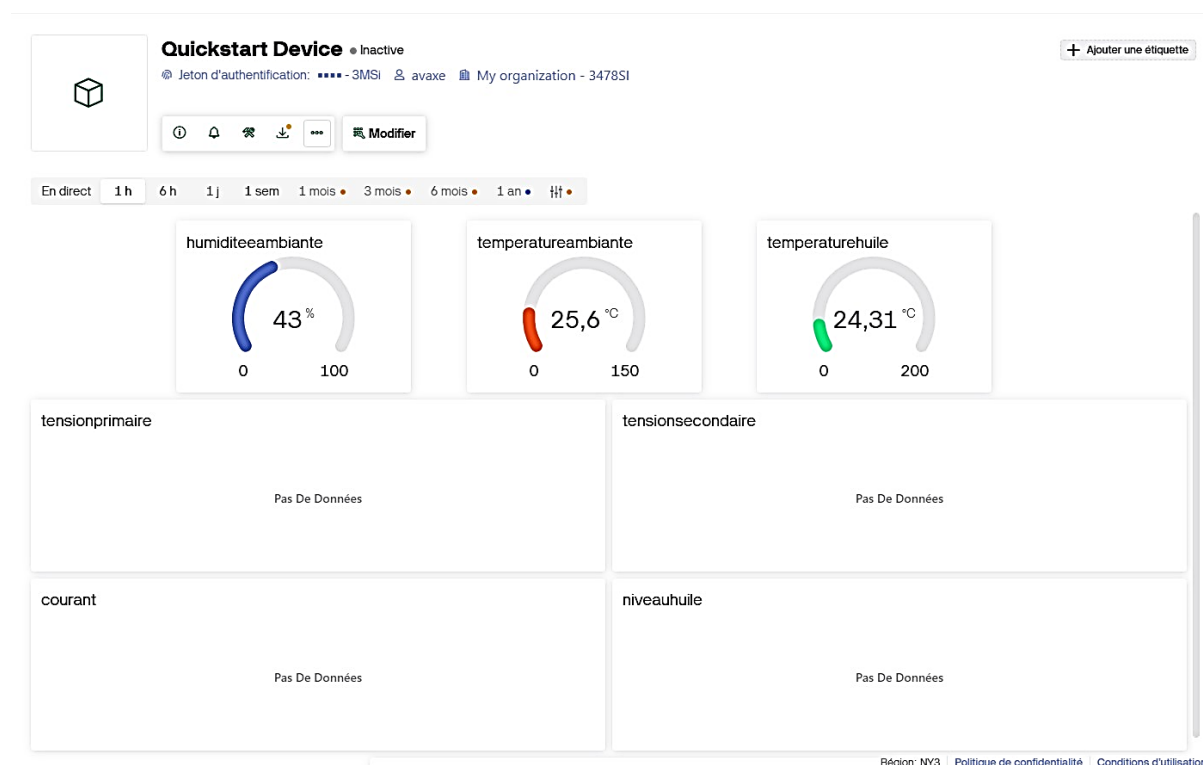


Figure 2-14 le tableau de bord de supervision sans données version web

Réalisation d'un système de monitoring pour la surveillance en temps réel des transformateurs de distribution via l'IoT : Cas de la SNEL Bukavu

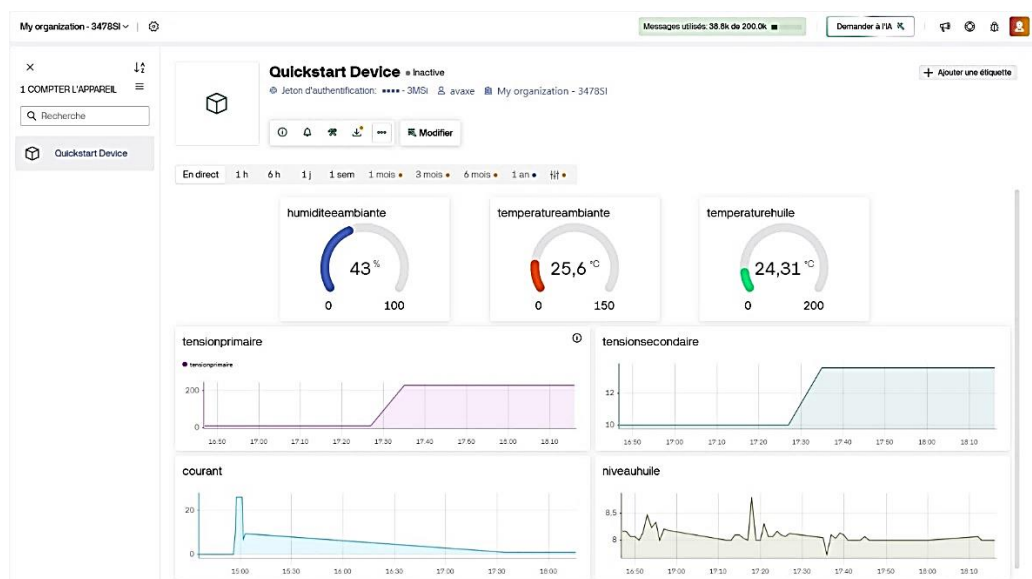


Figure 2-15 le tableau de bord de supervision avec données version web

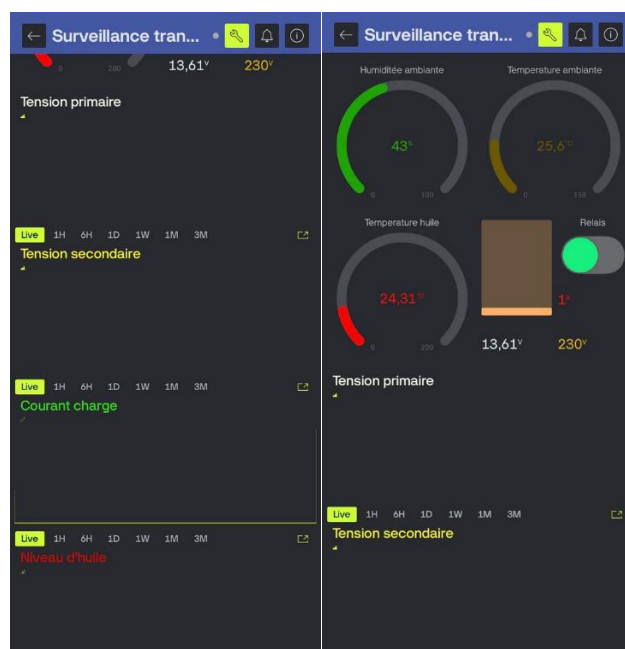


Figure 2-16 le tableau de bord de supervision version Mobile

BAGISHE BASHIMBE DANIEL

danielbenit56@gmail.com

- **Visualisation analogique (Gauges) :** En haut de l'écran, trois cadrans circulaires permettent une lecture rapide des paramètres critiques. Ils offrent une vue d'ensemble immédiate sur les niveaux de température et d'humidité environnants.
- **Graphiques de tendances (SuperCharts) : Tension primaire et secondaire :** Ces graphiques permettent de surveiller la stabilité de la tension fournie par la SNEL et la sortie du transformateur. On y observe la montée en charge progressive du système.
- **Courant :** Ce graphique trace la consommation électrique, permettant de détecter d'éventuelles surcharges.
- **Niveau d'huile :** Ce tracé illustre la stabilité ou les fluctuations du niveau d'huile isolante, un paramètre vital pour éviter les arcs électriques internes.
- **Contrôle à distance (Commande contacteur) :** En bas de l'interface, un bouton interactif permet au technicien de commander manuellement le contacteur. Cette fonctionnalité est essentielle pour isoler le transformateur du réseau à distance en cas d'urgence.
- L'historique des données affiché (de 1h à 1 an) permet au gestionnaire du réseau à Bukavu d'analyser les pics de charge passés pour mieux planifier les futures extensions du réseau.

2.4 Liste du matériel électronique utilisé

Le prototype a été réalisé à l'aide de composants électroniques standards, choisis pour leur complémentarité et leur fiabilité dans le cadre d'une surveillance automatisée. Le tableau 2-1 suivant répertorie l'ensemble du matériel électronique utilisé pour la conception et la réalisation de l'unité de contrôle.

Tableau 2-1 Inventaire et fonctions du matériel électronique de contrôle.

Matériel Électronique	Rôle et Fonctionnement Technique
Microcontrôleur ESP32	Unité centrale gérant l'acquisition des données et la communication WiFi.
Module Relais 5V	Commutateur de puissance pour la déconnexion automatique du transformateur.
Buzzer Actif 5V	Indicateur sonore pour l'alerte locale en cas d'anomalie.
Capteur ZMPT101B	Mesure de la tension AC avec isolation pour la sécurité du circuit.
Capteur ACS712 (20A)	Capteur de courant à effet Hall pour le monitoring de la charge.
Sonde DS18B20	Capteur de température étanche pour la surveillance de l'huile.
Capteur HC-SR04	Module à ultrasons pour mesurer le niveau d'huile du conservateur.
Capteur DHT11	Contrôle de l'humidité et de la température ambiante interne.

Matériel Électronique	Rôle et Fonctionnement Technique
Écran LCD 16x2 + I2C	Afficheur local pour la visualisation des paramètres du système.
Ampèremètre Analogique	Lecture directe de l'intensité pour une vérification visuelle rapide.
Voltmètre Numérique	Module LED pour le contrôle permanent de la tension secteur.
Pont de Graetz	Conversion du courant alternatif en courant continu pour l'électronique.
Condensateurs (Lot)	Stabilisation de l'alimentation et suppression des parasites.
Résistances (100kΩ et 33kΩ)	Division de la tension.
Résistance (Pull-up 4.7kΩ)	Configuration des capteurs

2.5 Conclusion partielle

Pour conclure, ce chapitre a permis de poser les bases techniques indispensables avant la fabrication du système. Nous avons d'abord conçu un organigramme logique pour définir précisément comment l'ESP32 doit réagir face aux mesures des capteurs, notamment pour déclencher la ventilation ou couper le courant en cas de danger. Ensuite, la présentation de notre modèle sous Proteus a servi à confirmer le schéma électrique et le bon choix des composants pour protéger le transformateur. Enfin, la création de l'interface sur l'application Blynk a finalisé la partie supervision, garantissant que l'agent de maintenance pourra suivre l'état du système partout et à tout moment. Ce travail de modélisation étant terminé, nous disposons désormais de tous les éléments nécessaires pour passer au chapitre suivant, consacré à la réalisation matérielle et aux tests réels du prototype.

Chapitre 3

Intégration matérielle et simulation virtuelle du dispositif de supervision

3.1 Introduction

Ce troisième chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique de notre travail. Après avoir défini les bases théoriques nécessaires, il s'agit maintenant de tester et de réaliser le système de supervision proposé. Notre démarche s'est déroulée en deux étapes simples : nous avons d'abord utilisé la simulation sur Proteus pour vérifier que les branchements et le programme fonctionnaient correctement. Ensuite, nous avons procédé à la fabrication d'une petite maquette de démonstration. Cette étape matérielle nous permet de visualiser le comportement du système, dont les données et l'interface de contrôle sont consultables directement sur ordinateur. Cette approche nous permet de suivre l'évolution des paramètres en temps réel de manière claire, tout en s'assurant que le prototype répond aux attentes fixées.

3.2 Simulation virtuelle sur Proteus

La simulation sur Proteus a été utilisée comme une étape préliminaire de vérification du circuit électronique. Il convient de préciser que l'environnement Proteus ne disposant pas de modèle natif pour le microcontrôleur ESP32, nous avons eu recours à un Arduino Nano pour cette phase. Ce remplacement nous a permis de tester la viabilité du schéma électrique et la compatibilité des bibliothèques de capteurs dans un environnement virtuel.

Cette étape s'est limitée exclusivement à un test de fonctionnement interne du circuit. L'objectif n'était pas encore d'envoyer des données vers un ordinateur ou une interface externe, mais de s'assurer que les connexions entre le microcontrôleur et les périphériques (capteurs et

actionneurs) étaient correctes. Cette validation purement technique nous a permis d'éliminer les erreurs de câblage potentielles et de confirmer la logique du programme avant de passer à l'assemblage définitif du prototype réel sur l'ESP32. Les figures (3-1, 3-2, 3-3 et 3-4) ci-dessous montrent la simulation du système sous Proteus.

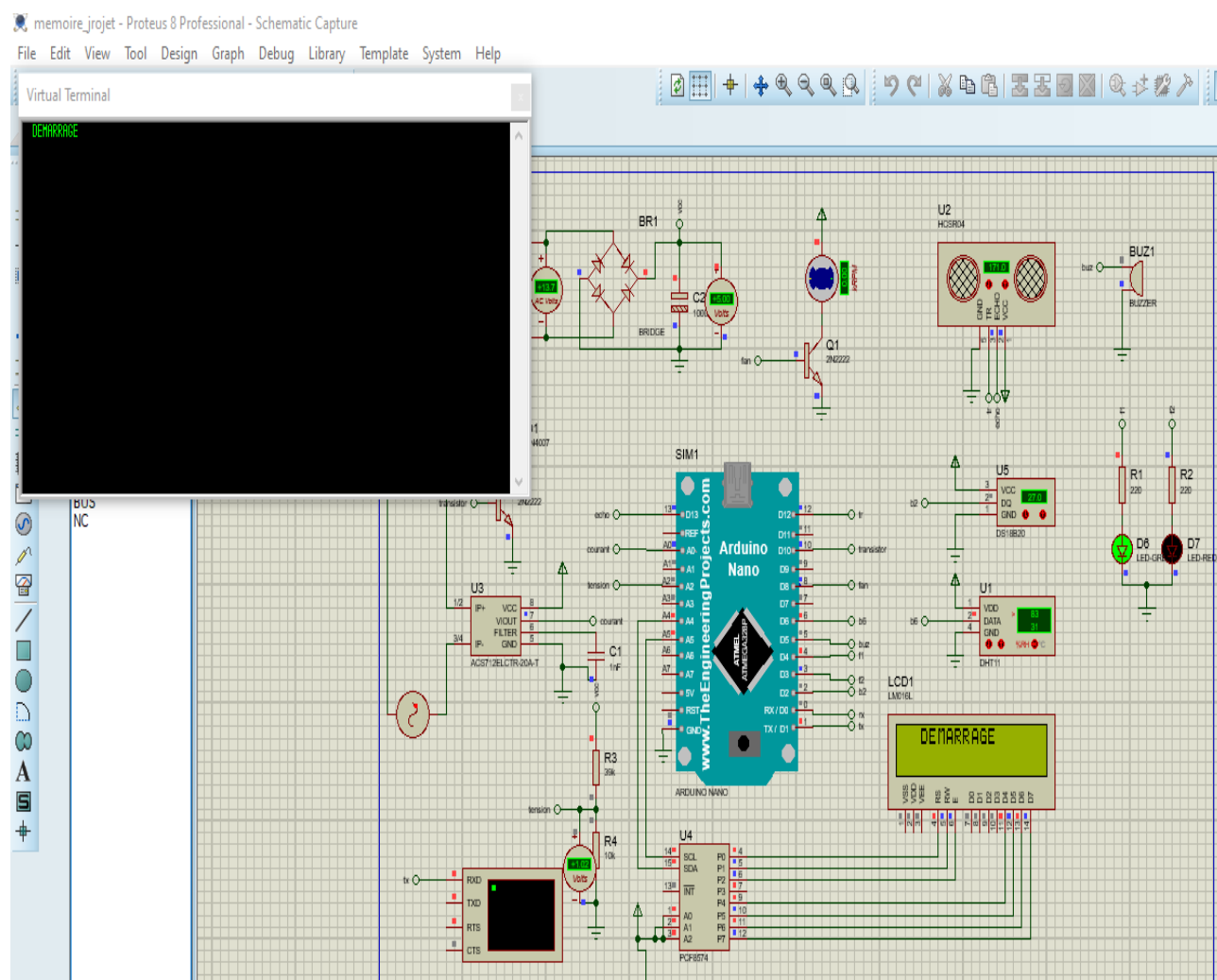
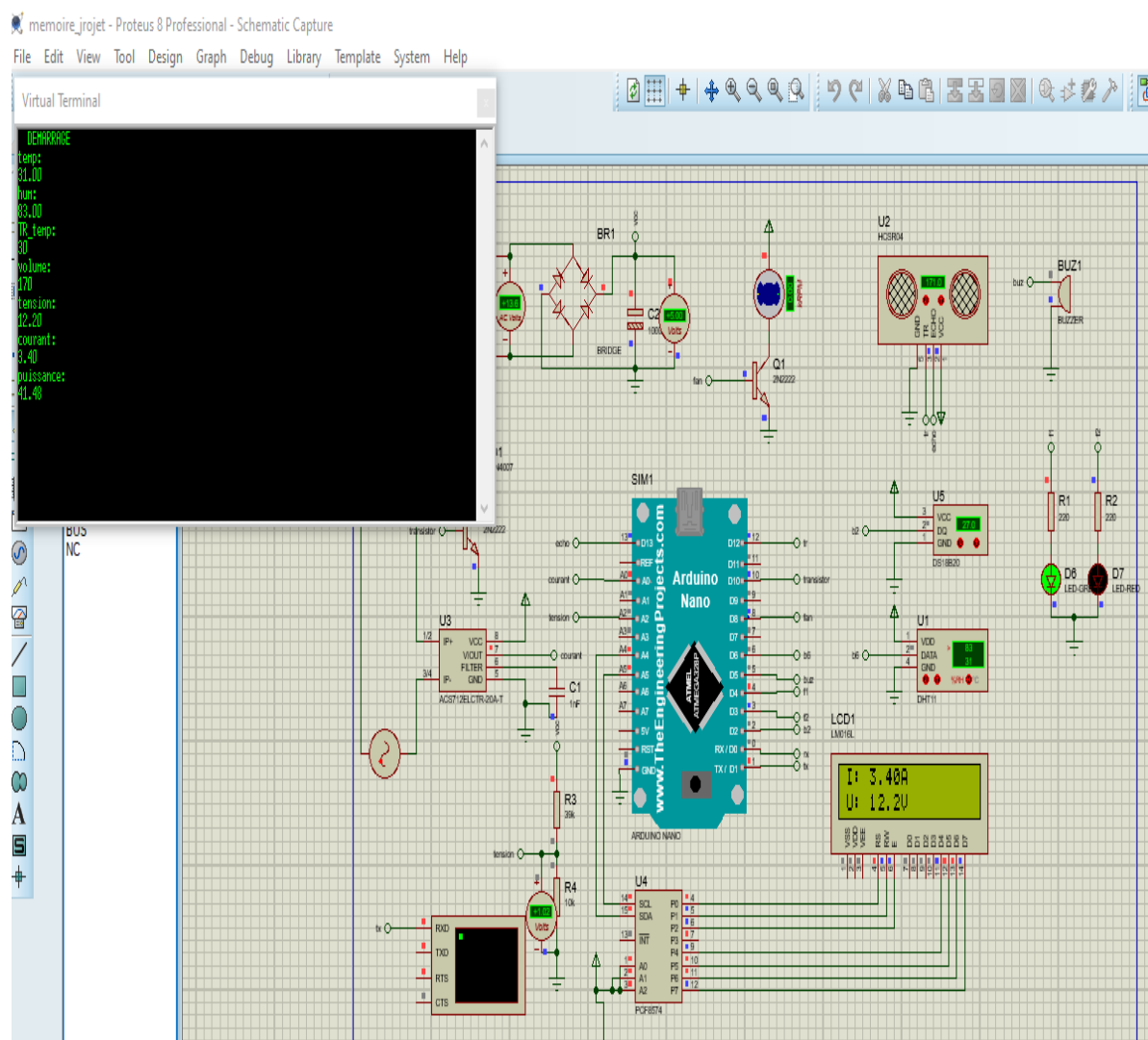


Figure 3-1 Simulation du système en mode démarrage sous Proteus

Cette figure montre le test de fonctionnement du circuit sur le logiciel Proteus. On peut y voir l'acquisition d'une température de 36.0°C affichée sur l'écran LCD. Cette étape a simplement permis de vérifier que le code de programmation et les connexions entre les capteurs et l'unité de contrôle fonctionnent comme prévu avant de passer à l'assemblage réel du prototype.



Sur cette figure L'écran LCD affiche ici une intensité de 3,40 A et une tension de 12,2 V. Cette étape de simulation a permis de vérifier la précision du calcul des paramètres de charge (courant et tension) par l'unité centrale, s'assurant ainsi que le système pourra détecter correctement une éventuelle surcharge sur le transformateur avant la phase de réalisation pratique.

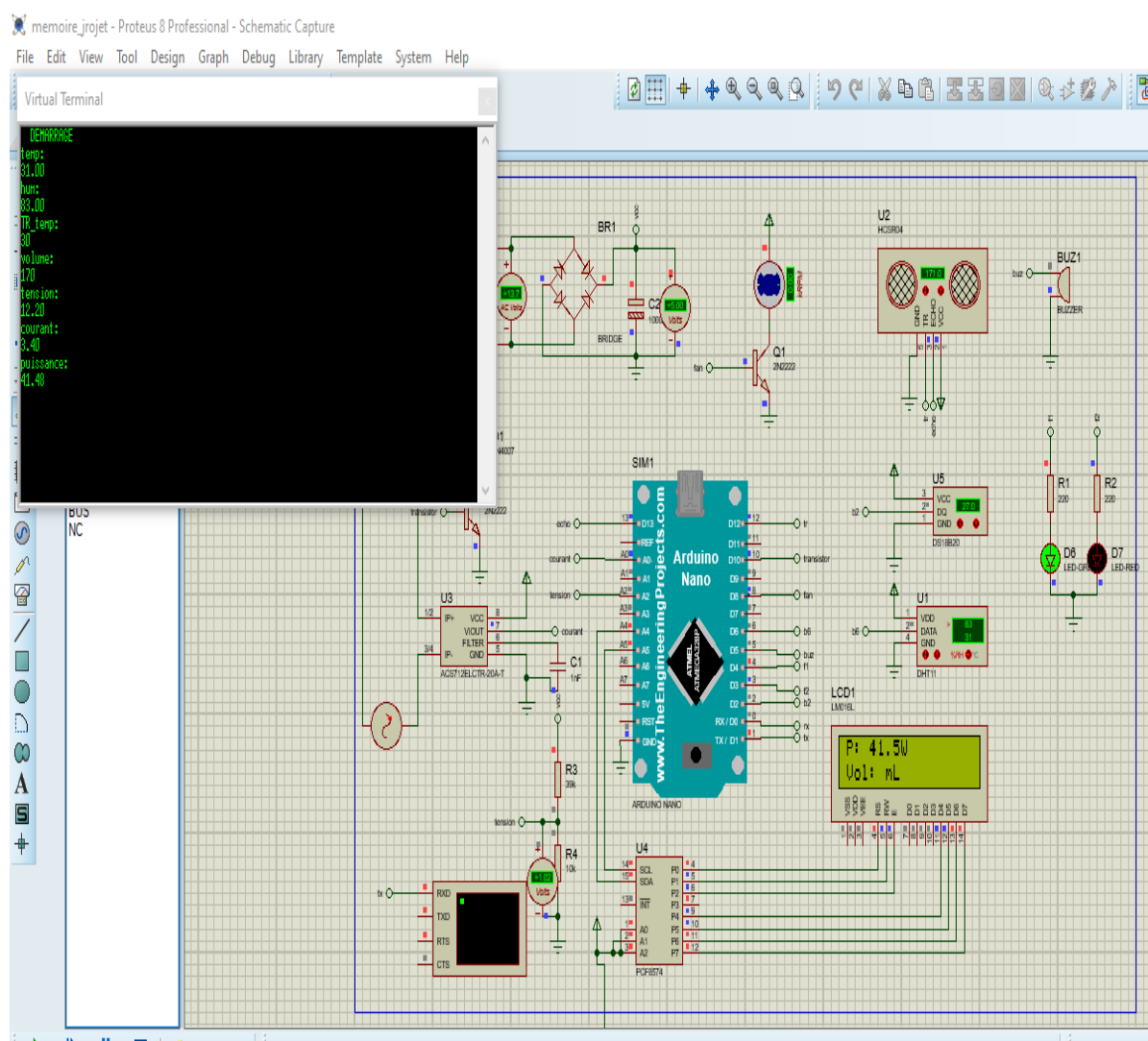


Figure 3-4 Simulation du système en cours et affichage des résultats

Cette figure montre le test de calcul de la puissance consommée (41,5 W) ainsi que l'intégration d'un paramètre de volume d'huile (85,0 mL), simulant par exemple le niveau d'huile du transformateur. Cette phase de simulation a permis de confirmer la capacité de l'unité de traitement à gérer simultanément plusieurs types de données hétérogènes. L'objectif était de s'assurer que le système peut centraliser toutes les informations critiques nécessaires à une surveillance complète avant la mise en œuvre matérielle.

Cette étape assure la validation fonctionnelle du système sous l'environnement Proteus. On y observe l'évolution de l'affichage sur l'écran LCD, qui alterne cycliquement pour présenter l'intégralité des paramètres surveillés : la température ambiante et celle du transformateur, les grandeurs électriques de courant et de tension, ainsi que la puissance active calculée et le volume d'huile restant.

En parallèle, le Virtual Terminal confirme la cohérence du traitement logiciel en affichant en temps réel les données brutes prêtes à être transmises vers la plateforme IoT.

3.3 Conception de la structure mécanique en bois par CNC

Le design de la forme a d'abord été conçu sur un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Ce fichier a ensuite été traduit en G-Code pour être exécuté par la machine CNC.

Plutôt que d'éparpiller les composants, nous avons regroupé l'intelligence du système (ESP32), les indicateurs visuels (LCD, LEDs) et les organes de sécurité (Buzzer, Boutons) dans une structure compacte en bois. Dans le cadre de la réalisation physique de la maquette, la priorité a été donnée à la fiabilité fonctionnelle et à la robustesse des connexions électroniques plutôt qu'à l'esthétique pure du boîtier. L'utilisation du bois découpé à la CNC a permis d'obtenir une structure solide et précise pour le maintien des capteurs, mais le design final présente certaines limites visuelles.

Les figures (3-5, 3-6, et 3-7) ci-dessous montrent Les captures d'écran du dessin technique en le lancement effectif de la découpe numérique et Assemblage du boîtier après découpage vue 3D.

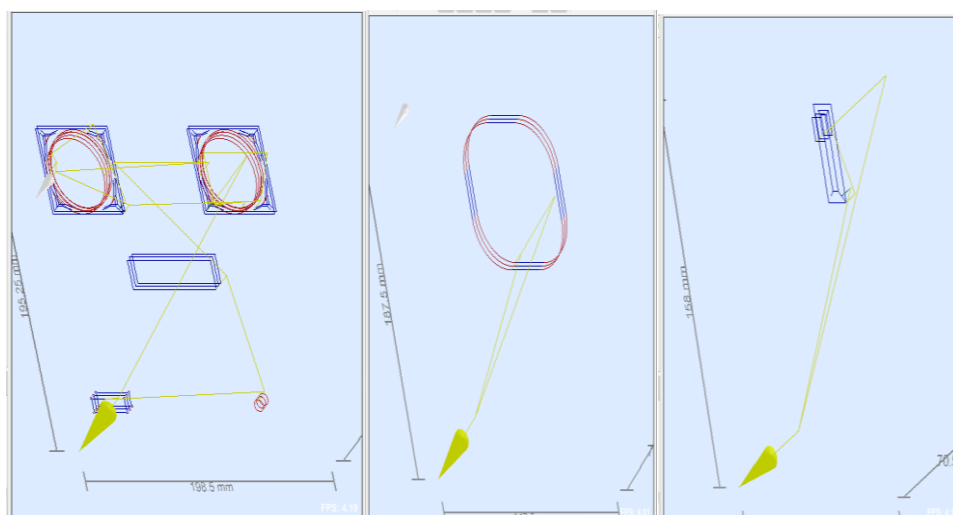


Figure 3-5 les faces du boîtier en bois



Figure 3-6 découpage sur la machine CNC



Figure 3-7 Assemblage du boîtier après découpage vue 3D

L'étape de l'expérimentation constitue le pivot central de ce travail. Elle a pour objectif de valider la capacité du prototype à assurer une surveillance continue et précise des paramètres vitaux du transformateur. Après la phase de conception, il s'agit maintenant de démontrer que le système est capable de traduire des phénomènes physiques en informations numériques exploitables, consultables en temps réel sur la plateforme Blynk.

Le but est de prouver que le technicien de la SNEL à Bukavu peut, grâce à ce dispositif, être informé instantanément d'une anomalie (température élevée, baisse du niveau d'huile ou surcharge) afin d'intervenir manuellement de manière préventive.

3.3.1 Test de surveillance thermique et environnementale (DHT11 et DS18B20)

Ce test vise à valider la capacité du système à monitorer simultanément les conditions internes du transformateur (huile) et les conditions externes (ambiance de la cabine).

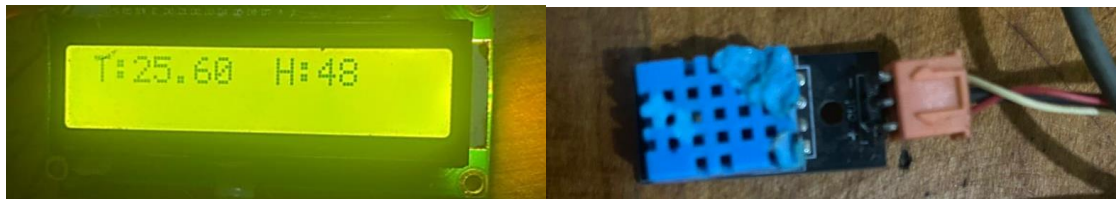


Figure 3-8 Affichage local et dht 11 en condition normale

Comme le montre la figure 3-8 ci-dessus, L'écran local affiche une température de **25,60°C** et une humidité de **48%**.

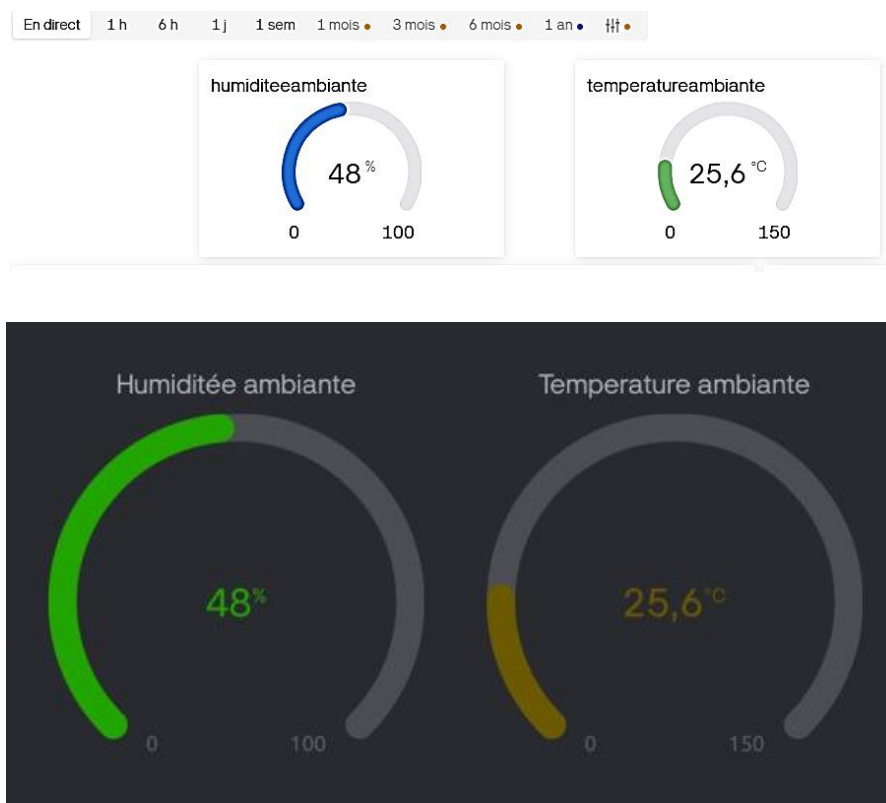


Figure 3-9 Affichage des résultats web et mobile

Simultanément, la plateforme Blynk (en mode clair sur ordinateur et sombre sur mobile) affiche exactement les mêmes valeurs : **25,6°C** et **48%**, comme montre la figure 3-9 ci-haut.

Pour valider la sensibilité du système, nous avons approché un fer à souder en chauffe au-dessus du capteur. Comme l'illustre les figures (3-10 et 3-11) suivant, on observe une réaction immédiate des jauges numériques.



Figure 3-10 Test avec fer à souder

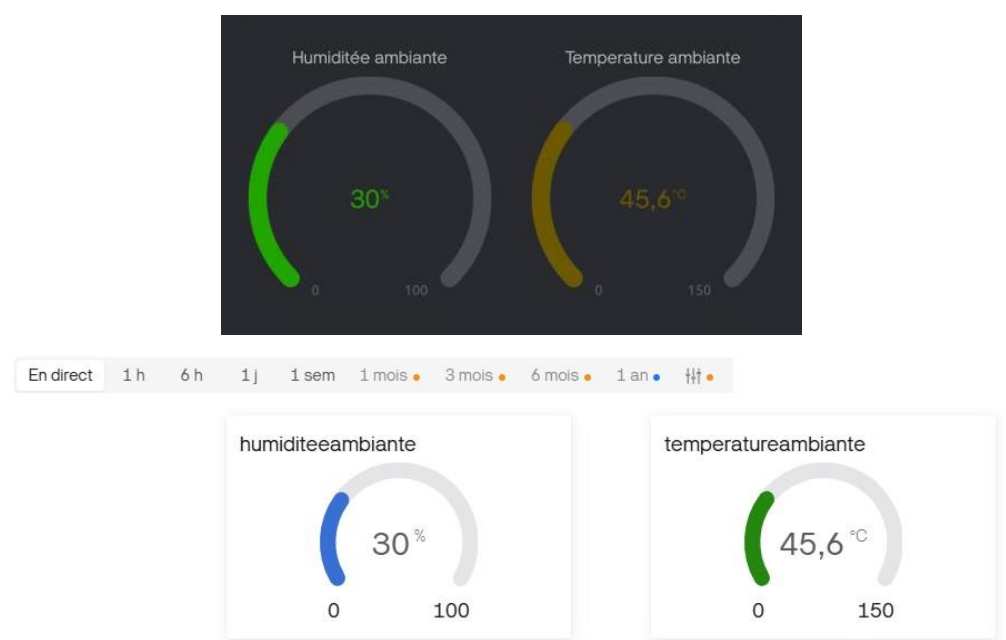


Figure 3-11 Affichage des résultats web et mobile

Pour valider la surveillance de l'hygrométrie, nous avons exposé le prototype à une source d'humidité artificielle (brumisateurs). Cette expérience simule une dégradation brutale des conditions ambiantes dans la cabine de transformation.



Figure 3-12 Brumisateur et test de l'humidité



Figure 3-13 Affichage de résultat sur l'écran LCD

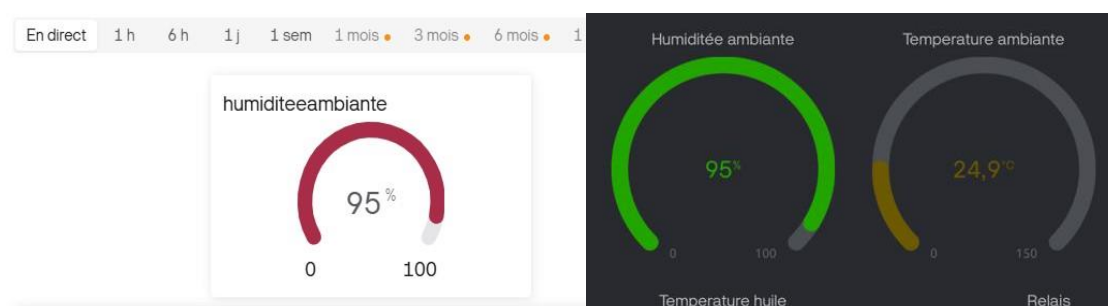


Figure 3-14 Affichage des résultats web et mobile

En approchant le fer à souder, nous avons observé une montée rapide de la température sur la jauge, passant de **25,6 °C** (valeur ambiante) à **45,6 °C**. Cette variation de **20 °C** a été répercutée instantanément sur les interfaces Web et Mobile, démontrant une excellente sensibilité de la chaîne de mesure.

Lors de l'utilisation du brumisateur, le taux d'humidité est passé brusquement de **30 %** à **95 %**. Ce passage d'un air sec à une atmosphère saturée a été détecté sans latence par le capteur DHT11, Comme le montrent les figures (3-13, et 3-14) ci-haut.

3.3.2 Test de monitoring thermique de l'huile (Sonde DS18B20)

Après avoir validé la surveillance de l'environnement extérieur (cabine), cette seconde phase d'expérimentation se concentre sur le paramètre le plus critique pour la survie d'un transformateur de puissance : la température de son huile diélectrique. En effet, l'échauffement interne est le principal facteur de vieillissement prématuré des isolants solides (papiers) et liquides.

Avant de procéder au chauffage de l'huile, nous avons effectué un test de calibration à l'air libre comme montrent les images (3-15 et 3-16) ci-dessous. Cette étape permet de vérifier la précision de la sonde **DS18B20** et la synchronisation de la chaîne de transmission en conditions normales.



Figure 3-15 Affichage de résultat sur LCD et sonde a l'air libre

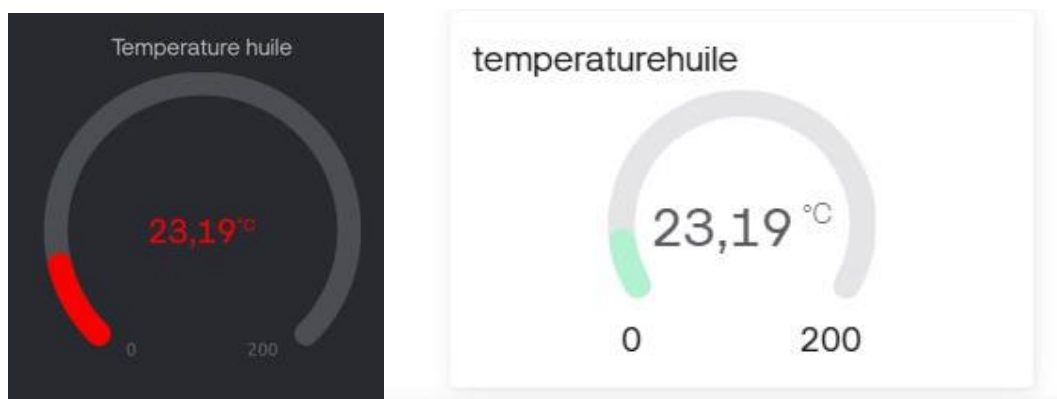


Figure 3-16 Affichage des résultats web et mobile

La valeur de **23,19 °C** s'affiche avec une précision de deux décimales, ce qui démontre la haute résolution de la sonde numérique par rapport aux capteurs analogiques classiques. Au même instant, nous constatons que cette valeur exacte de **23,19 °C** est répercutée à la fois sur l'application mobile et sur la plateforme Web Blynk.



Figure 3-17 Affichage de résultat sur LCD et sonde plongée dans l'eau chaude

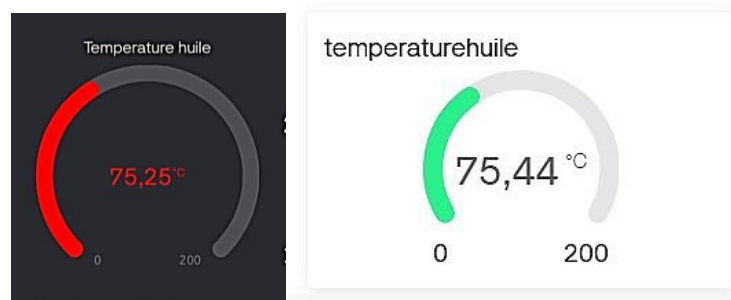


Figure 3-18 Affichage des résultats web et mobile

Ce test démontre que le prototype est capable de passer d'une température ambiante (23,19 °C) à une température opérationnelle élevée (75,44 °C) avec une grande réactivité comme montrent les figures (3-17 et 3-18) ci- haut.

3.3.3 Test de monitoring du niveau d'huile (Capteur Ultrasonique HC-SR04)

Le niveau d'huile dans le conservateur ou la cuve principale est un indicateur vital. Une baisse de ce niveau signifie souvent une fuite lente ou une évaporation anormale. Ce test a pour but de valider la capacité du capteur à mesurer avec précision la distance entre le haut du réservoir et la surface du liquide, puis à traduire cette distance en un volume exploitable (litres).

Pour vérifier la réactivité du système sans avoir à remplir ou vider réellement une cuve de grande capacité, nous avons procédé à une simulation dynamique en déplaçant manuellement un obstacle (une plaque plane) devant le capteur ultrasonique HC-SR04. En rapprochant l'obstacle du capteur (simulant un remplissage d'huile), nous avons observé sur l'interface **Blynk** une montée fluide et immédiate de la courbe sur le graphique historique (**SuperChart**) Lh est considéré comme niveau d'huile. Comme montrent les images (3-19, 3-20) ci-dessous.



Figure 3-19 Affichage de résultat sur LCD



Figure 3-20 Déplacement de l'obstacle

À chaque fois que nous déplaçons l'obstacle devant le capteur ultrasonique, on observe une variation immédiate sur la courbe. La montée de la ligne rouge correspond au rapprochement de l'obstacle (simulant un remplissage), tandis que les paliers horizontaux témoignent de la stabilité de la mesure lorsque le niveau est statique comme illustre les images des figures (3-21, 3-22, et 3-23) ci-dessous.

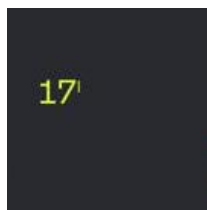


Figure 3-21 Affichage a l'instant sur mobile



Figure 3-22 Graphique montra les variations sur mobile

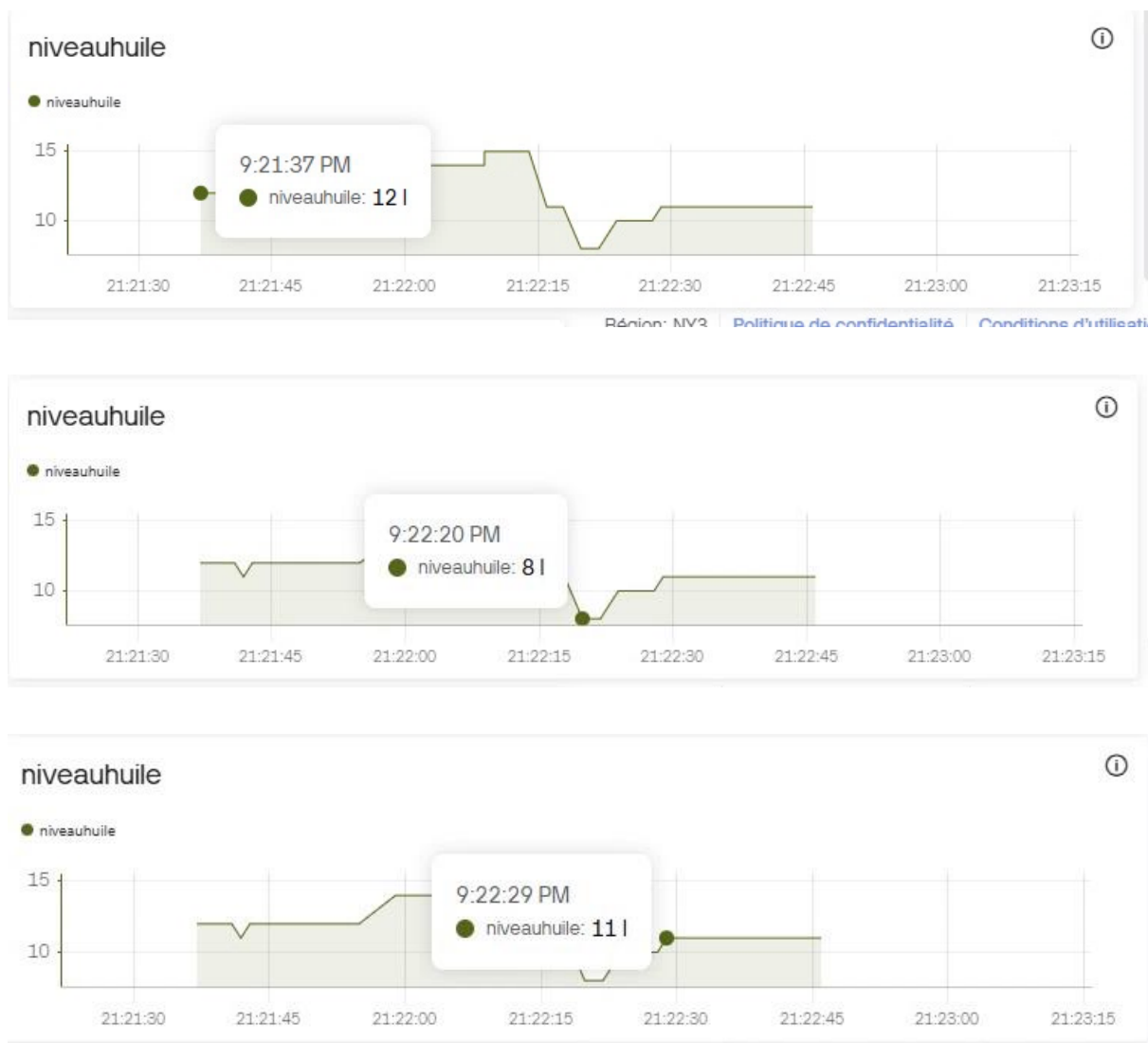


Figure 3-23 Graphique montra les variations sur web

Ces relevés prouvent que le système n'est pas seulement un afficheur, mais un enregistreur de données. L'étiquette "8 L" à 21 :22 :20, 11L à 21 :22 :29 et 12L à 21 :21 :37 démontrent que même après plusieurs heures, le système continue de monitorer précisément le niveau. Pour la SNEL, cela permet de consulter l'historique d'une journée entière pour vérifier s'il y a eu une baisse lente du niveau d'huile durant la nuit.

3.3.4 Test de surveillance de la tension primaire

La stabilité de la tension d'alimentation est un facteur déterminant pour la durée de vie des isolants d'un transformateur. Une surtension prolongée peut conduire à une dégradation thermique irréversible, tandis qu'une sous-tension augmente l'échauffement par effet Joule pour une même puissance appelée [92].

Cette phase de test vise à confronter la mesure classique à la surveillance connectée. Pour ce faire, nous avons utilisé un **voltmètre analogique** de référence afin de calibrer notre système et valider les données transmises comme montrent les images (3-24, 3-25, 3-26 et 3-27) ci-dessous.



Figure 3-24 Graphique montrant le graphique primaire sur mobile

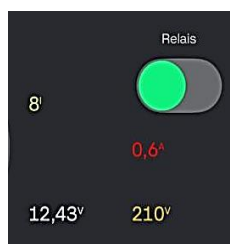


Figure 3-25 Affichage à l'instant sur mobile

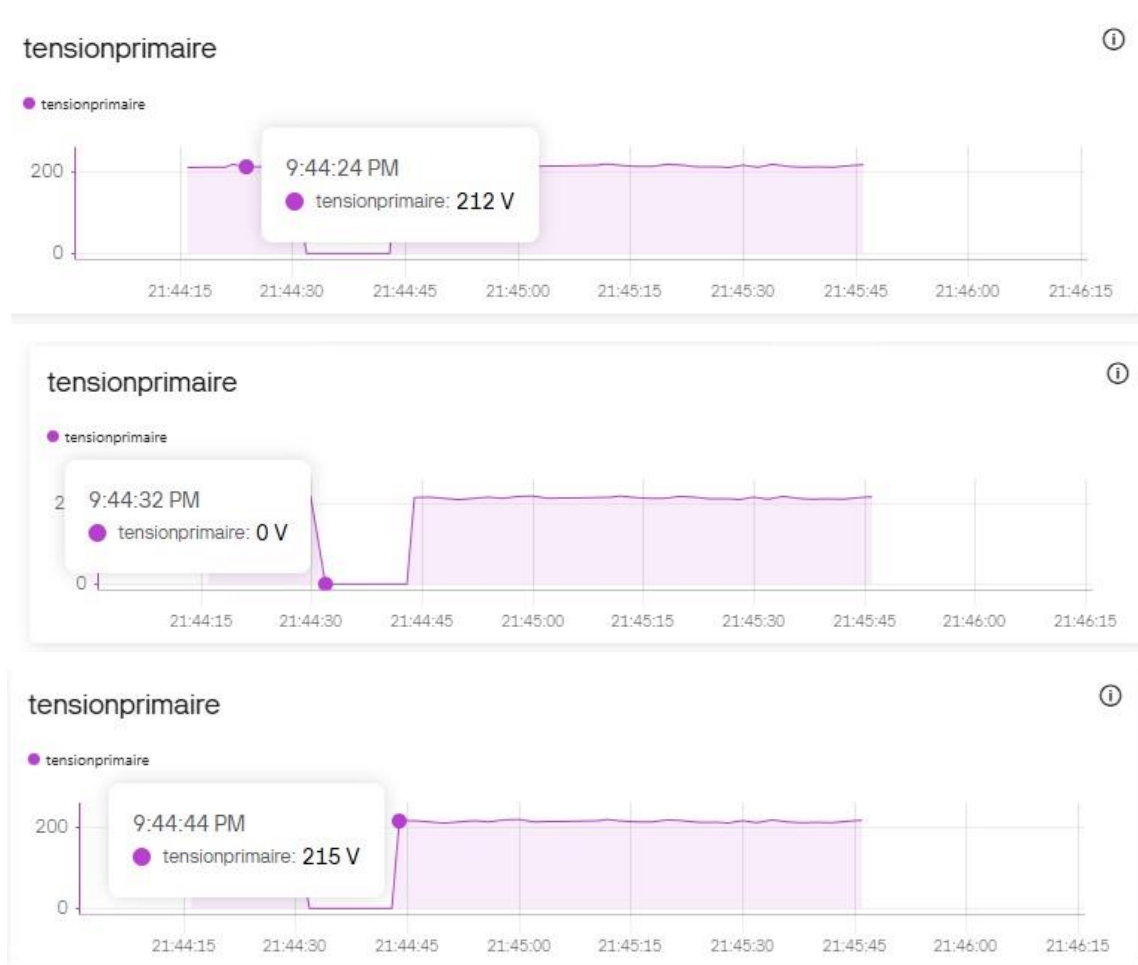


Figure 3-26 Graphique montra les variations de la tension primaire sur web



Figure 3-27 appareil analogique montre la tension primaire

Cette phase expérimentale met en évidence la précision du système de mesure numérique par rapport à l'instrumentation analogique classique. Les résultats obtenus sur les différentes interfaces (Blynk et voltmètre) permettent de valider la fiabilité de la surveillance électrique.

L'aiguille indique une valeur stabilisée aux alentours de 215 V à 220 V. On note cependant que la lecture sur ce type d'appareil reste approximative et sujette à l'erreur humaine de parallaxe.

La plateforme affiche des valeurs numériques précises et fluctuantes en temps réel, telles que 212 V, 215 V, Le passage au numérique offre une lecture plus fine, permettant de saisir des variations de tension que l'œil humain ne peut pas distinguer sur une échelle analogique.

Sur le graphique (notamment vers 21 :44 :00), on observe une chute nette de la tension vers 0 V. Ce "trou" dans le graphique simule soit une coupure de courant, La capacité du système à enregistrer cet événement avec un horodatage précis (9 :44 :32 PM) est un atout majeur pour la maintenance. Elle permet aux ingénieurs de la SNEL de retracer l'heure exacte d'un incident réseau pour une analyse post-panne.

3.3.5 Test de monitoring de la tension secondaire

Le monitoring de la tension secondaire est l'étape ultime de la distribution d'énergie. C'est ce paramètre qui garantit la qualité de l'électricité fournie aux abonnés. Pour ce test, nous avons maintenu notre protocole de double lecture : une mesure sur voltmètre analogique et une lecture sur les interfaces Blynk. Les figures (3-28, 3-29, 3-30 et 3-31) ci-dessous montrent les différents affichages de cette tension secondaire.

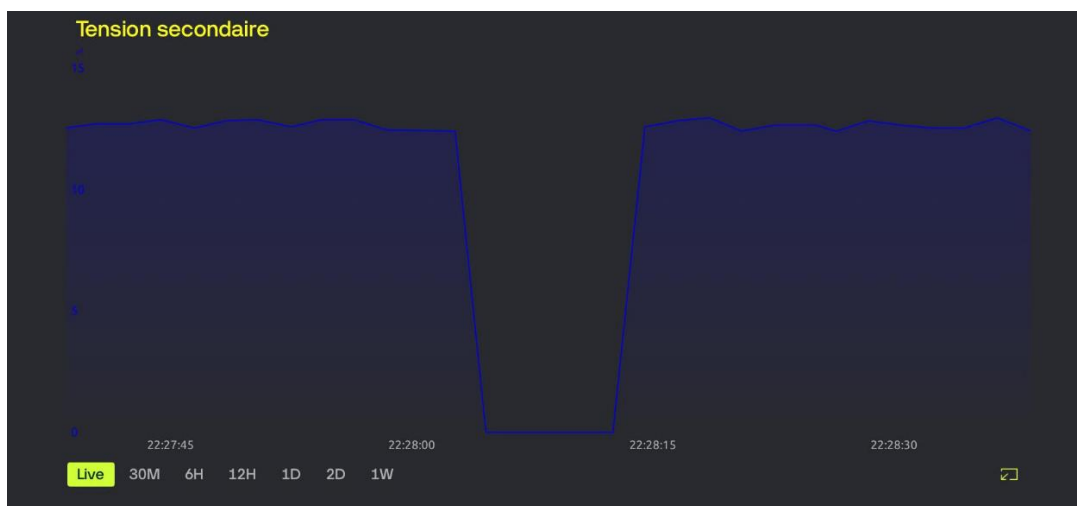


Figure 3-28 Graphique montrant la tension secondaire sur mobile

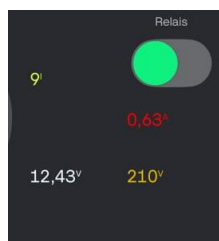


Figure 3-29 Affichage à l'instant sur mobile

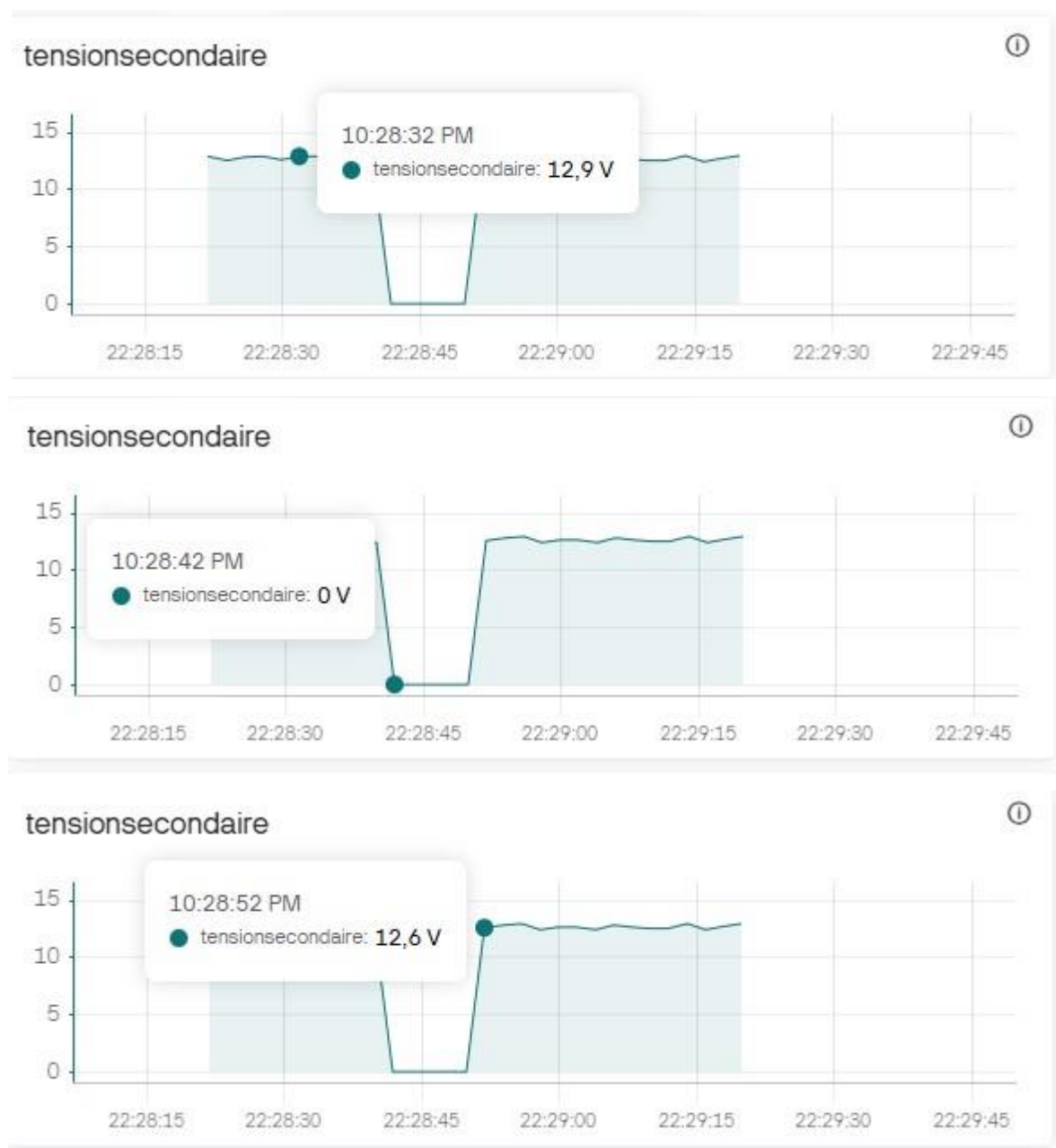


Figure 3-30 Graphique montra les variations de la tension secondaire sur web



Figure 3-31 Appareil analogique montre la tension secondaire

On observe de légères oscillations sur le haut de la courbe entre **12,9 V** et **12,6 V**. Cela prouve la haute sensibilité du système capable de capter les variations de charge en temps réel. Le graphique montre une chute verticale à **0 V** précisément à **10 :28 :42 PM** qui correspond on débranchement du circuit, puis la remontée immédiate à **12,6 V** dix secondes plus tard (**10 :28 :52 PM**) constitue une nouvelle mise sous tension du circuit. Bien que les valeurs affichées ici correspondent à une simulation sur un modèle réduit (basse tension de sécurité), la précision du système est démontrée. L'ESP32 parvient à convertir le signal analogique du capteur en une donnée numérique stable, facilitant une lecture exacte sans risque d'erreur d'interprétation humaine.

3.3.6 Test de monitoring du courant de charge

Le courant est l'image directe de la charge demandée par les abonnés de la **SNEL**. Pour valider la mesure de l'intensité, nous avons utilisé un fer à souder comme charge témoin. Ce test permet de simuler une consommation réelle sur le transformateur et de vérifier la précision de la chaîne d'acquisition du courant. Nous avons branché un **ampèremètre analogique** en série avec le fer à souder. L'ensemble de la charge passe par les bornes du capteur de courant **ACS712**, lui-même relié à l'entrée analogique de l'**ESP32**.

Voici les figures (3-32, 3-33 et 3-34) du courant de charge ;



Figure 3-32 Graphique montra le graphique du courant de charge sur mobile



Figure 3-33 Affichage a l'instant sur mobile

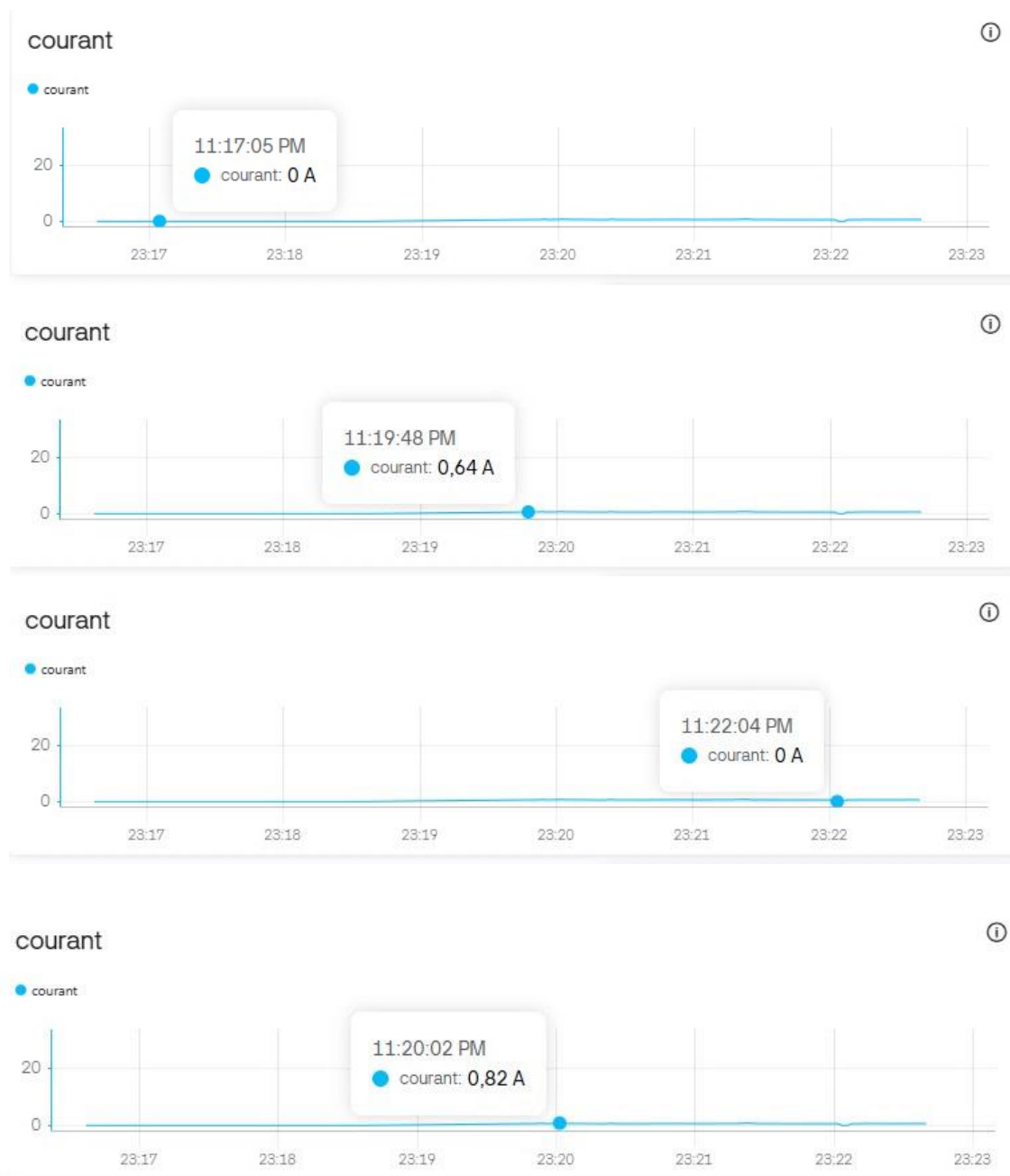




Figure 3-34 Graphique montra les variations du courant de charge sur web

On observe un courant de **0 A**. Cela démontre l'efficacité du filtrage logiciel (seuil de silence), le système stabilise la valeur à zéro lorsque aucune charge n'est connectée, évitant ainsi des erreurs d'interprétation sur la consommation réelle. Lors de l'activation d'une première charge, le système enregistre une montée instantanée du courant à des valeurs comprises entre **0,64 A et 0,66 A**. La linéarité de la courbe sur ces segments indique une stabilité de la charge connectée.

3.3.7 Notifications mobiles

Pour assurer un suivi à distance du transformateur, nous avons développé une interface mobile sur la plateforme **Blynk**. Cette solution permet non seulement la lecture des données en temps réel, mais aussi la réception de notifications instantanées en cas d'anomalie. Les figures (3-35 et 3-36) suivantes illustrent l'interface de réception des alertes sur smartphone, confirmant la réactivité du système de communication IoT en cas d'anomalie détectée.

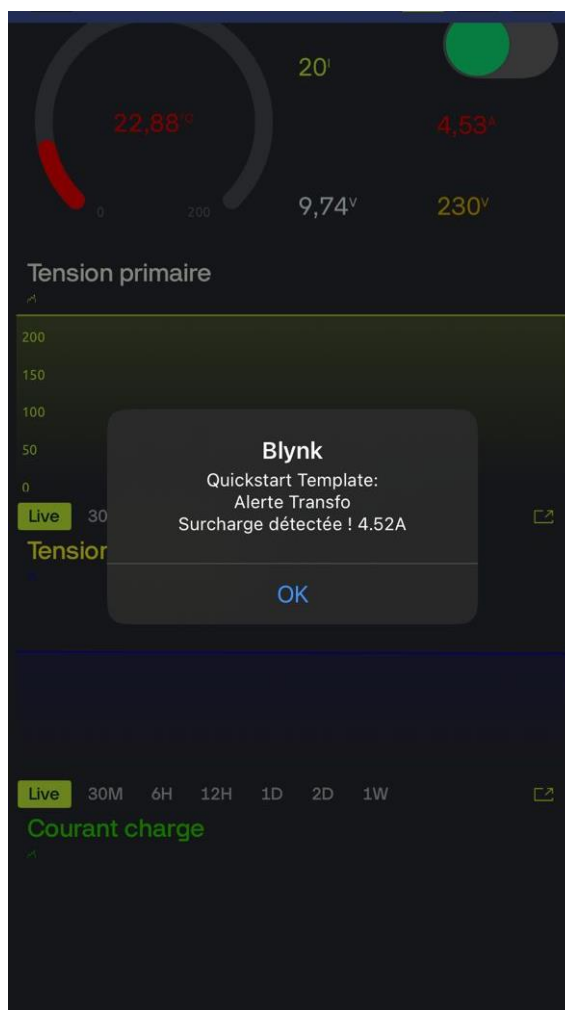


Figure 3-35 Interface Blynk lors d'un test de charge simulant une anomalie d'intensité.

Sur cette capture, on observe une fenêtre contextuelle (Pop-up) indiquant : « **Alerte Transfo : Surcharge détectée ! 4.52A**, Le capteur de courant ACS712 a transmis une valeur dépassant le seuil de sécurité préprogrammé. L'ESP32 a immédiatement traité l'information pour envoyer une notification prioritaire.

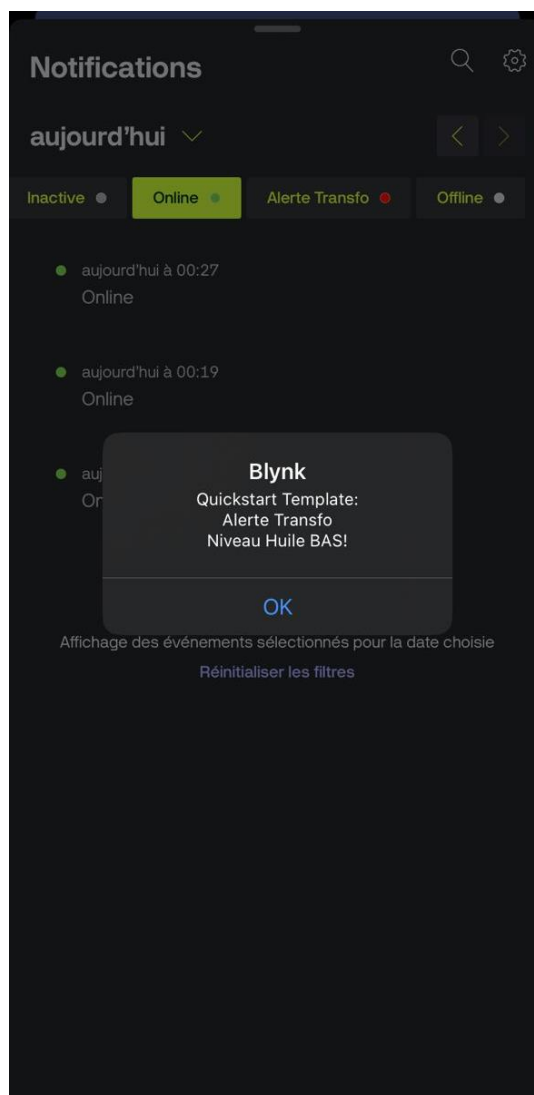


Figure 3-36 Notification de sécurité générée par le capteur de niveau d'huile.

Le message : « **Alerte Transfo : Niveau Huile BAS !** ». Ici, c'est le capteur à ultrasons (HC-SR04) qui a détecté une baisse anormale du niveau d'huile dans le conservateur. Cette notification est cruciale car elle permet d'anticiper une panne majeure avant que le transformateur ne subisse des dommages irréversibles par manque d'isolation ou de refroidissement.

Afin de mettre en évidence les améliorations apportées par notre prototype, nous avons résumé dans le tableau 3-1 suivant les principales différences entre les méthodes de surveillance conventionnelles et la solution basée sur l'Internet des Objets (IoT) que nous avons développée.

Tableau 3-1 Comparaison entre la surveillance classique et le système IoT proposé

Critères de comparaison	Système Classique (Actuel)	Système de Surveillance Smart (Proposé)
Mode de relève	Manuelle (déplacement d'un agent sur site).	Automatique (transmission sans fil via ESP32).
Fréquence de suivi	Ponctuelle (ex: une fois par jour ou par semaine).	Continue (monitoring en temps réel 24h/24).
Gestion des alertes	Visuelle (voyants sur le transformateur).	Instantanée (Notifications push sur smartphone).
Historisation	Registres papier ou rapports manuels.	Stockage numérique sur le Cloud (Blynk).
Sécurité du matériel	Dépend de l'intervention humaine après panne.	Coupure automatique préventive (Relais).
Précision des mesures	Estimation ou lecture analogique simple.	Mesure numérique précise (Capteurs dédiés).

3.4 Conclusion partielle

En définitive, les essais réalisés sur ce prototype ont permis de valider la faisabilité d'un système de suivi à distance pour les infrastructures électriques de la **SNEL Bukavu**. Les mesures effectuées montrent une correspondance satisfaisante entre les paramètres réels du transformateur et les données affichées sur les interfaces de supervision. On note une synchronisation cohérente entre les supports Web et mobile, ce qui permet un accès flexible aux informations de fonctionnement. Sans prétendre à une précision industrielle absolue, ce dispositif constitue un outil d'aide à la décision accessible. Cette étape expérimentale confirme ainsi l'intérêt de l'IoT pour renforcer la surveillance du réseau de distribution local et limiter les pannes imprévues par un suivi régulier.

Conclusion générale

Arrivé au terme de notre étude portant sur la « Réalisation d'un système de monitoring pour la surveillance en temps réel des transformateurs de distribution via l'IoT », il convient d'en synthétiser les principaux enseignements. L'objectif central de ce travail était de concevoir un dispositif capable de surveiller en temps réel les paramètres critiques d'un transformateur de distribution afin d'anticiper d'éventuelles défaillances sur le réseau de la SNEL Bukavu.

Tout au long de notre démarche, nous avons d'abord exploré les fondements théoriques des transformateurs et les enjeux de leur maintenance. Par la suite, nous avons dimensionné et réalisé un prototype articulé autour du microcontrôleur ESP32 et de divers capteurs (courant, tension, température et niveau d'huile). Les tests expérimentaux effectués ont confirmé la faisabilité technique de cette approche : le système parvient à collecter et à transmettre des données cohérentes vers une plateforme de supervision accessible sur interface Web et mobile.

L'un des résultats les plus encourageants réside dans la synchronisation des informations sur ces différentes plateformes, prouvant que l'IoT peut offrir une visibilité constante aux techniciens, même à distance. Toutefois, nous restons conscients des limites de ce travail. En tant que prototype académique, la précision des mesures pourrait être affinée par l'utilisation de capteurs de classe industrielle, et la robustesse du boîtier mériterait d'être adaptée aux conditions environnementales sévères des postes de distribution.

En définitive, cette étude ne prétend pas résoudre l'intégralité des défis liés à la distribution électrique à Bukavu. Elle constitue néanmoins une modeste contribution démontrant que l'intégration de technologies numériques accessibles peut renforcer la fiabilité des équipements de la SNEL. Nous espérons que ce travail servira de base à des recherches ultérieures visant à généraliser le monitoring intelligent pour une gestion plus durable et prédictive de l'énergie électrique dans notre région.

Contributions

La conception de ce système de monitoring prend tout son sens dans le contexte des infrastructures électriques de la ville de Bukavu. La stabilité du réseau de distribution de la SNEL à Bukavu est souvent compromise par des surcharges sur les transformateurs de quartier, entraînant des pannes fréquentes et des incendies de cabines.

- **Axe Analytique :** Le couplage des données de charge et de température d'huile constitue un indicateur de santé (Health Index) minimal mais robuste. Pour la SNEL, ce jeu de données est crucial : il permet d'évaluer l'accélération du vieillissement thermique des isolants, souvent causée par les surcharges récurrentes dans les quartiers de Bukavu, facilitant ainsi la planification budgétaire des remplacements.
- **Axe Décisionnel :** L'interface virtuelle dématérialise la contrainte physique. Pour un technicien en milieu urbain, cette visibilité à distance transforme la prise de décision : au lieu d'une réaction à l'aveugle, il dispose d'un tableau de bord diagnostique permettant de hiérarchiser les urgences sans déplacement systématique. Les techniciens peuvent identifier à distance si une anomalie nécessite une coupure d'urgence ou une simple surveillance, réduisant ainsi les temps d'interruption de service (blackouts) pour les abonnés de Bukavu.
- **Axe Prédictif :** L'intégration de la modélisation IoT propose une alternative à la maintenance curative classique. En observant les comportements thermiques en temps réel, ce système permet d'identifier plus facilement les anomalies thermiques avant qu'elles ne s'aggravent. Cette approche aide ainsi à passer d'une maintenance préventive rigide à une surveillance plus réactive, où l'analyse des tendances observées permet de mieux évaluer l'urgence d'une intervention.

Critique du travail

L'architecture technique, bien que fonctionnelle pour une preuve de concept, présente des vulnérabilités liées à la connexion du l'ESP32, où toute rupture de la communication série paralyse la remontée des données. L'utilisation de capteurs de type "low-cost" limite la précision des mesures, notamment pour le capteur de courant ACS712 qui s'avère extrêmement sensible aux champs magnétiques environnants sans un filtrage numérique avancé. De plus, l'absence de circuit imprimé (PCB) et le recours à un câblage filaire augmentent les risques de faux contacts et de bruits parasites. Enfin, la dépendance exclusive au protocole Wi-Fi et à un serveur Cloud tiers (Blynk) constitue une limite critique pour la résilience du système en cas d'instabilité du réseau local.

Travaux futurs de recherche/Perspectives

L'évolution de ce prototype vers une solution de monitoring de classe industrielle repose sur plusieurs axes d'amélioration technique et logicielle :

- **Optimisation du matériel (Hardware) :** Le passage d'un câblage filaire à la conception d'un circuit imprimé (PCB) permettrait de réduire les bruits parasites et d'améliorer la fiabilité mécanique. L'intégration de capteurs industriels blindés et d'un boîtier en acier ou polycarbonate assurerait une protection contre les champs électromagnétiques et les contraintes thermiques extrêmes des transformateurs.
- **Résilience de la connectivité :** Pour pallier la dépendance au Wi-Fi, l'ajout d'un module de secours GSM/GPRS ou l'utilisation de protocoles de longue portée type LoRaWAN garantirait la transmission des alertes même dans des zones isolées ou en cas de coupure réseau.

- **Intelligence embarquée et Maintenance prédictive :** L'implémentation d'algorithmes d'Edge AI (intelligence artificielle embarquée) permettrait d'analyser en temps réel les tendances de température et de charge. Cela transformerait le système de simple outil de mesure en un outil de maintenance prédictive, capable d'anticiper une défaillance avant qu'elle ne survienne.
- **Autonomie énergétique :** Une extension majeure consisterait à rendre le boîtier autoalimenté en récupérant l'énergie directement sur le passage du courant du transformateur par induction, rendant ainsi le système totalement indépendant des sources d'alimentation externes.

Bibliographie

- [1] J. P. K. Lukanda, « Analyse des défaillances des transformateurs de distribution dans les réseaux électriques de l'Est de la RDC : cas de la ville de Bukavu », *Revue Congolaise des Sciences Appliquées*, vol. 4, n° 2, pp. 45-52, 2021.
- [2] M. S. Khalid et al., "IoT Ecosystem for Smart Grid Applications: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12543-12560, 2022.
- [3] International Electrotechnical Commission, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*, IEC Standard 60076-7, 2018.
- [4] M. N. Numbi et J. M. Munda, "Design of a Smart Energy Management System for a Residential Grid-Connected Microgrid in DRC," *2019 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Abuja, Nigeria, 2019, pp. 1-5.
- [5] International Electrotechnical Commission, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*, IEC Standard 60076-7, 2018.
- [6] P. M. Kabeya, "Évaluation des pertes techniques dans les réseaux de distribution de la SNEL," *Journal de l'Ingénieur Congolais*, vol. 14, no. 1, pp. 22-30, 2021.
- [6] P. M. Kabeya, « Évaluation des pertes techniques dans les réseaux de distribution de la SNEL », *Journal de l'Ingénieur Congolais*, vol. 14, no. 1, pp. 22-30, 2021. [7] G. I. 2022.2.23, « Système de surveillance de l'état des transformateurs de distribution basé sur l'IoT », Rapport technique, AIUB, 2022.
- [8] A. T. Kabasela, "Optimisation de la maintenance des réseaux de distribution par les outils numériques," Mémoire de licence, Département de Génie Électrique, ULPGL, Goma, 2022.
- [9] S. V. Devane et R. A. Metri, « Predictive Maintenance of Power Transformer using IoT and Machine Learning », *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, n° 06, pp. 412-417, juin 2020.

- [10] Commission Électrotechnique Internationale, *Transformateurs de puissance – Partie 7 : Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile*, Norme CEI 60076-7, 2018.
- [11] S. V. Devane et R. A. Metri, « Predictive Maintenance of Power Transformer using IoT and Machine Learning », *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, n° 06, pp. 412-417, 2020.
- [12] Commission Électrotechnique Internationale, *Transformateurs de puissance – Partie 7 : Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile*, Norme CEI 60076-7, 2018.
- [13] M. S. Khalid et al., « IoT Ecosystem for Smart Grid Applications: A Review », *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12543-12560, 2022.
- [14] Commission Électrotechnique Internationale (CEI), *Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités*, Norme CEI 60076-1, 2011.
- [15] D. A. Ravi Shankar Chauhan, "Fault Detection in Three Phase Transformer Using Decision Tree," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015.
- [16] T. Wildi, *Électrotechnique*, 4e éd. Bruxelles : De Boeck Supérieur, 2005.
- [17] Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2015. J. Sanchez, "Faults diagnostic aid on power transformers. Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance," Université de Grenoble, 2011 GRENT031, 2011.
- [18] " Distribution Transformer " https://www.researchgate.net/figure/Sectional-Layout-of-a-Distribution-Transformer-sourceAmadi-and-Izuegbunam-2016_fig1_384008614
- [19] H. Hadiki, *Supervision et prédiction des défauts des transformateurs électriques en utilisant les techniques de Machine Learning*, Mémoire de Maîtrise, UQAT, 2024.
- [20] J.-C. Sabonnadière, *Le transformateur électrique*, Paris, France : Lavoisier, 2002.
- [21] CEI, *Transformateurs de puissance - Partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*, Norme CEI 60076-3, 2013

- [22] " Distribution Transformer " <http://automationnerd.blogspot.com/2016/06/all-about-transformers.html>
- [23] Commission Électrotechnique Internationale (CEI), *Norme CEI 60076-11 : Transformateurs de type sec*, 2004
- [24] "Types of Electric Transformers." <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-transformer/types-of-electric-transformers.html> (accessed).
- [25] J. Sanchez, "Faults diagnostic aid on power transformers. Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance," Université de Grenoble, 2011GRENT031, 2011.
- [26] J.-C. Sabonnadière, *Le transformateur électrique*, Lavoisier, 2002.
- [27] IEEE Std C57.12.00, *Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 2015.
- [28] A. Steimel, *Electric Traction - Motive Power and Energy Supply*, 2008. (Spécificités du domaine ferroviaire).
- [29] "Modernisation du Réseau électrique." <https://www.tcw.com/Insights/2024/2024-02-27-Sustainable-Insight>
- [30] IEEE C57.91-2011, *Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*.
- [31] CEI 60422, *Lignes directrices pour la maintenance de l'huile dans les matériels électriques*.
- [32] P. Lyonnet, *Maintenance : Mathématiques & Méthodes*, Lavoisier, 2012.
- [33] J. Boulanger, *Gestion de la maintenance des transformateurs de puissance*, Techniques de l'Ingénieur.
- [34] A. Naderian et al., *A Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010.
- [35] R. Buyya and A. V. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*, Morgan Kaufmann, Elsevier, 2016.
- [36] Union Internationale des Télécommunications (UIT-T), *Série Y.2060 : Vue d'ensemble de l'Internet des objets*, Juin 2012.

- [37] O. Vermesan and P. Friess, *Internet of Things - From Research and Innovation to Market Deployment*, River Publishers, 2014.
- [38] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, *The Internet of Things: A survey*, Computer Networks, Vol. 54, No. 15, 2010.
- [39] P. P. Ray, *A survey on Internet of Things architectures*, Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 2018. (Idéal pour justifier l'approche par couches).
- [40] J. Lin et al., *A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications*, IEEE Internet of Things Journal, 2017.
- [41] M. Weyrich and C. Ebert, *Reference Architectures for the Internet of Things*, IEEE Software, Vol. 33, No. 1, 2016.
- [42] " IoT Architecture " https://www.researchgate.net/figure/Basic-three-layered-IoT-architecture_fig1_346555860
- [43] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [44] P. Ripka, "Current sensors using magnetic materials," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 43, no. 24, Jun. 2010
- [45] M. A. S. Bhuiyan, M. M. Hoque, and M. S. Ahmed, "Internet of Things (IoT) Based Real-Time Distribution Transformer Health Monitoring System," in *Proc. 4th Int. Conf. on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEiCT)*, Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 433-437.
- [46] D. Ibrahim, *Arduino-Based Embedded Systems: Interfacing, Simulation, and LabVIEW GUI*. Oxford, UK: Newnes, 2015.
- [47] S. Soloman, *Sensors Handbook*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2010.

- [48] IEEE, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*, IEEE Std C57.91-2011, Mar. 2012.
- [49] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "IPv6 over Bluetooth Low Energy: Standards, Mechanisms, and Prospects," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 70–77, Dec. 2012.
- [50] P. Baronti *et al.*, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, May 2007.
- [51] T. Adame *et al.*, "IEEE 802.11AH: the WiFi solution for M2M communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 6, pp. 66–73, Dec. 2014.
- [52] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, Second Quarter 2017.
- [53] K. Mekki *et al.*, "A comparative study of LPWAN technologies for IoT deployments," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, Mar. 2019. (Référence majeure pour comparer NB-IoT et LoRa).
- [54] Y. P. E. Wang *et al.*, "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT)," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 117–123, Mar. 2017.
- [55] " Protocoles de réseau IoT sans fil " <https://www.mokosmart.com/fr/iot-networking-technologies-guide/>
- [56] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, 2015.
- [57] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, "The Constrained Application Protocol (CoAP)," *RFC 7252*, Jun. 2014.
- [58] P. P. Ray, "A survey on Internet of Things architectures," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 30, no. 3, pp. 291-319, Jul. 2018.

- [59] S. K. Sood and I. Mahajan, "Wearable IoT sensor based healthcare system for identifying and managing type 2 diabetes," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 13, Jul. 2018.
- [60] W. Yu *et al.*, "A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 6, 2018
- [61] M. A. S. Bhuiyan, "Internet of Things (IoT) Based Real-Time Distribution Transformer Health Monitoring System," in *Proc. 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT)*, Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 430-435.
- [62] J. Minoli, *Building the Internet of Things with IPv6 and MIPv6: The Evolving World of M2M Communications*, 1st ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013..
- [63] S. M. R. Islam, D. Kwak, M. H. Kabir, M. Hossain, and K. S. Kwak, "The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 678-708, 2015.
- [64] S. L. Da Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233-2243, Nov. 2014.
- [65] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22-32, Feb. 2014.
- [66] V. C. Gungor *et al.*, "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, Nov. 2011.
- [67] M. S. Bhalla and P. K. Ghosh, "IoT Based Health Monitoring of Power Transformer," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 8, no. 6, pp. 4032-4036, Aug. 2019.
- [68] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," v4.1, 2023. [Online]. Available: <https://www.espressif.com>.

- [69] K. Akkaya and I. Guvenc, "Energy-Efficient IoT for Smart Grids," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 1205-1214, 2018.
- [70] " ESP32-WROOM-32 " <https://www.edukasielektronika.com/2019/07/arsitektur-dan-fitur-esp32-module-esp32.html>
- [71] Allegro MicroSystems, "ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC," Datasheet, 2021.
- [72] " Capteur de courant ACS712 " <https://dynacart.com/1pcs-great-it-ac712-5a-20a-30a-range-hall-current-sensor-module-ac712-module-for-arduino-5a-20a-30a40.html>
- [73] Maxim Integrated, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," Datasheet, 2019.
- [74] Espressif Systems, "ESP32 Interface with DS18B20 Temperature Sensor," Technical Note, 2022.
- [75] T. K. Das et al., "Real-time health monitoring of power transformers using digital sensors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, 2019.
- [76] B. K. Debnath, "Digital temperature sensing for smart grid applications," *Int. Journal of Smart Grid*, 2020
- [77] " Capteur de température DS18B20 " <https://flprog.ru/tag/ds18b20/>
- [78] Aosong Electronics, "DHT22 (AM2302) Digital Humidity & Temperature Sensor Datasheet," Technical Manual, 2021.
- [79] S. Bhardwaj et al., "Low-cost IoT-based system for real-time monitoring of power transformers," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, 2020.
- [80] " Capteur d'hygrométrie DHT22 " <https://fr.hwlibre.com/dht22/>
- [81] Cytron Technologies, "HC-SR04 Ultrasonic Sensor Product User's Manual," v1.0, 2020.
- [82] " Capteur ultrasons HC-SR04 " <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-distancia-de-ultrasonido-hc-sr04/>

- [83] NXP Semiconductors, "PCF8574 Remote 8-bit I/O Expander for I2C-bus," Datasheet rev. 5, 2022.
- [84] A. Vardhan, "Implementation of I2C Protocol for LCD Interfacing with ESP32," *International Journal of Computer Applications*, vol. 174, no. 10, 2021.
- [85] " Ecran LCD 16x2 avec Interface I2C " <https://www.indiamart.com/proddetail/1602-serial-blue-backlight-lcd-module-iic-i2c-twi-23662802555.html>
- [86] Arduino CC, "Arduino IDE v2.0: Technical specifications and compiler architecture," 2023.
- [87] B. Stroustrup, *The C++ Programming Language*, 4th ed. Addison-Wesley, 2013.
- [88] M. Schwartz, *Internet of Things with ESP32*, 1st ed. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2018.
- [89] " IDE Arduino " <https://www.nitrathor.fr/fiches/ide-arduino>
- [90] " Interface Proteus ISIS " https://www.researchgate.net/figure/Interface-du-logiciel-ISIS-Proteus_fig14_361184747
- [91] V. Shkuratov, "Blynk IoT: Real-time data streaming and mobile visualization protocols," *Blynk Documentation*, 2021.
- [92] H. Bouchedda, *Modélisation et simulation des défauts dans les transformateurs de puissance*, Thèse de doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2017.

Annexe A

Devis Détaillé du Système de Surveillance

Désignation du Composant	Rôle / Spécification Technique	Qté	Prix (USD)
ÉLECTRONIQUE & IOT			
Microcontrôleur ESP32	Cerveau du système (WiFi/Dual Core)	1	13.00
Capteur de Tension ZMPT101B	Mesure AC isolée (Haute Sécurité)	1	4.50
Capteur de Courant ACS712 (20A)	Mesure du courant par Effet Hall	1	4.00
Ampèremètre Analogique	Lecture directe du courant (0-10A)	1	2.50
Voltmètre Numérique LED	Affichage de la tension secteur	1	2.50
Écran LCD 16x2 + Interface I2C	Affichage local des paramètres	1	6.00

Réalisation d'un système de monitoring pour la surveillance en temps réel des transformateurs de distribution via l'IoT : Cas de la SNEL Bukavu

Désignation du Composant	Rôle / Spécification Technique	Qté	Prix (USD)
Sondes (DS18B20 + HC-SR04)	Température Huile & Niveau	1 kit	6.00
Module Relais + Buzzer	Actionneurs de coupure et d'alarme	1 kit	5.00
Condensateurs Électrolytiques	Filtrage et lissage (1000µF + 470µF)	2	2.00
Résistances	Diviseurs de tension et Pull-up	3	1.00
MENUISERIE & STRUCTURE			
Panneaux de bois (Plywood)	Matériau de base du coffret	1 m²	4.00
Découpe de précision CNC	Façonnage numérique des 4 faces	Forfait	8.00
ÉNERGIE & PROTECTION			
Bouton ON/OFF Lumineux	Interrupteur général du montage	1	1.50

BAGISHE BASHIMBE DANIEL

danielbenit56@gmail.com

Réalisation d'un système de monitoring pour la surveillance en temps réel des transformateurs de distribution via l'IoT : Cas de la SNEL Bukavu

Désignation du Composant	Rôle / Spécification Technique	Qté	Prix (USD)
Porte-Fusible + Fusible 5A	Protection contre les surintensités	1	1.00
Étage d'alimentation (Pont)	Redressement	1 kit	4.00
ACCESSOIRES & FINITION			
Colle Glow (Silicone/Pistolet)	Fixation et isolation des composants	1 tube	3.50
Câblage (1.5mm ² & Jumpers)	Liaisons électriques et data	1 lot	5.00
COÛT TOTAL DU PROTOTYPE			75.51.00 USD

BAGISHE BASHIMBE DANIEL

danielbenit56@gmail.com

Annexe B

Code ESP32

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID      "TMPL29_AbxrH8"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME    "Quickstart Template"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN       "A0dQ6IWJyYAShCQFTS8LeW_lDmSb3MSi"

#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <Bonezegei_DHT11.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// --- CONFIGURATION DES BROCHES (GPIO ESP32) ---
#define PIN_RELAIS      23    // Coupure de sécurité
#define PIN_BUZZER      19    // Alarme sonore
#define PIN_DHT          4    // Humidité/Temp Air
#define PIN_DS18B20     15    // Température Huile
#define PIN_TRIG         5    // Ultrason (Trig)
#define PIN_ECHO        18    // Ultrason (Echo)
#define PIN_ACS712       34    // Courant (Analogique)
#define PIN_VOLTAGE      35    // Tension Primaire (Analogique via
diviseur/capteur)

// --- PARAMÈTRES TECHNIQUES ---
const float RAPPORT_TRANSFO = 16.9;
const float V_REF = 3.3;      // Tension de référence ESP32
const float ADC_RES = 4095.0; // Résolution 12 bits
const float SENSIVITY_ACS = 0.185; // Sensibilité capteur 5A
const float COEFF_TENSION = 101.5; // Coefficient d'étalonnage tension
(à ajuster)

// Objets
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
Bonezegei_DHT11 dht(PIN_DHT);
OneWire oneWire(PIN_DS18B20);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
BlynkTimer timer;
```

BAGISHE BASHIMBE DANIEL

danielbenit56@gmail.com

```
// Variables WiFi
char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;
char ssid[] = "transfocontrol";
char pass[] = "1234567890";
unsigned long lastDisplaySwitch;
bool showPage2 = false;

// --- FONCTION MESURE DISTANCE (NIVEAU HUILE) ---
long getOilLevel() {
    digitalWrite(PIN_TRIG, LOW); delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(PIN_TRIG, HIGH); delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(PIN_TRIG, LOW);
    return pulseIn(PIN_ECHO, HIGH) / 58.0;
}

// --- FONCTION MESURE TENSION AC ---
float getACVoltage() {
    float maxVal = 0;
    uint32_t start = millis();
    while(millis() - start < 100) { // Lecture sur 5 cycles (50Hz)
        int read = analogRead(PIN_VOLTAGE);
        if(read > maxVal) maxVal = read;
    }
    float vPeak = (maxVal * V_REF) / ADC_RES;
    float vRMS = (vPeak / 1.414) * COEFF_TENSION; // Conversion RMS
    return (vRMS < 10) ? 0 : vRMS; // Seuil de bruit
}

// --- FONCTION MESURE COURANT RMS ---
float getACCurrent() {
    float sumSquares = 0;
    long count = 0;
    uint32_t start = millis();
    while (millis() - start < 100) {
        float v = (analogRead(PIN_ACS712) * V_REF) / ADC_RES;
        float curr = (v - (V_REF/2)) / SENSIVITY_ACS;
        sumSquares += (curr * curr);
        count++;
    }
    return sqrt(sumSquares / count);
}

// --- BOUCLE DE SURVEILLANCE ET SÉCURITÉ ---
void processSystem() {
    // 1. Acquisition
```

BAGISHE BASHIMBE DANIEL

danielbenit56@gmail.com

```
sensors.requestTemperatures();
float tHuile = sensors.getTempCByIndex(0);
float tAir = (dht.getData()) ? dht.getTemperature() : 0;
int hAir = dht.getHumidity();
long nHuile = getOilLevel();
float uPrim = getACVoltage();
float uSec = uPrim / RAPPORT_TRANSFO;
float iSec = getACCurrent();

// 2. Logique de décision (Sécurités)
bool critereCoupure = false;
String alerteMsg = "";

if (tHuile >= 95) { critereCoupure = true; alerteMsg = "SURCHAUFFE
HUILE!"; }
else if (nHuile <= 5) { critereCoupure = true; alerteMsg = "NIVEAU
HUILE CRITIQUE!"; }
else if (uPrim > 245) { critereCoupure = true; alerteMsg = "SURTENSION
SECTEUR!"; }
else if (iSec > 4.5) { critereCoupure = true; alerteMsg = "SURCHARGE
COURANT!"; }

// 3. Exécution des protections
if (critereCoupure) {
    digitalWrite(PIN_RELAIS, LOW); // DÉCONNEXION
    digitalWrite(PIN_BUZZER, HIGH); // ALERTE SONORE
    Blynk.logEvent("alerte_critique", alerteMsg); // NOTIFICATION
SMARTPHONE
} else {
    digitalWrite(PIN_RELAIS, HIGH); // ÉTAT NORMAL
    digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);
}

// 4. Envoi Cloud Blynk (V0 à V6)
Blynk.virtualWrite(V0, hAir);
Blynk.virtualWrite(V1, tAir);
Blynk.virtualWrite(V2, tHuile);
Blynk.virtualWrite(V3, uPrim);
Blynk.virtualWrite(V4, nHuile);
Blynk.virtualWrite(V5, iSec);
Blynk.virtualWrite(V6, uSec);

// 5. Gestion Affichage LCD (Alternance toutes les 3s)
if (millis() - lastDisplaySwitch > 3000) {
    showPage2 = !showPage2;
    lastDisplaySwitch = millis();
}
```

BAGISHE BASHIMBE DANIEL

danielbenit56@gmail.com

```
        lcd.clear();
    }
    lcd.setCursor(0,0);
    if (!showPage2) {
        lcd.print("Up:"); lcd.print(uPrim,1); lcd.print("V Us:");
        lcd.print(uSec,1);
        lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Is:"); lcd.print(iSec,2);
        lcd.print("A");
    } else {
        lcd.print("Th:"); lcd.print(tHuile,1); lcd.print("C L:");
        lcd.print(nHuile);
        lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Ta:"); lcd.print(tAir,1);
        lcd.print("C");
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(PIN_RELAIS, OUTPUT);
    pinMode(PIN_BUZZER, OUTPUT);
    pinMode(PIN_TRIG, OUTPUT);
    pinMode(PIN_ECHO, INPUT);

    Wire.begin(21, 22); // I2C pour ESP32
    lcd.init(); lcd.backlight();
    lcd.print("SYSTEM START...");

    sensors.begin();
    dht.begin();
    Blynk.begin(auth, ssid, pass);

    timer.setInterval(2000L, processSystem); // Cycle de 2 secondes
    digitalWrite(PIN_RELAIS, HIGH); // Fermer le relais au démarrage
}

void loop() {
    Blynk.run();
    timer.run();
}
```