



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département De Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance de l'Automatisme et de l'Instrumentation

Thème

Conception d'un système avancé de traçabilité et de visibilité en temps réel pour les opérations logistiques

Présenté et soutenu publiquement par :

Draou Hanaa et Djilali Hamida Nesrine

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Taha Benarbia	MCB	IMSI-Université D'Oran 2	Président
Mekki Ibrahim El khalil	Pr	IMSI-Université D'Oran 2	Encadreur
TITAH Mawloud	MCA	IMSI-Université D'Oran 2	Co-Encadreur
Adda Neggaz Samir	MAA	IMSI-Université D'Oran 2	Examineur

Année 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos plus sincères remerciements à nos encadrants, M. Mekki Ibrahim El Khalil, M. Titah Mawloud. Nous les remercions chaleureusement pour leur précieuse orientation, leur disponibilité constante, leurs conseils avisés et la confiance qu'ils nous ont accordée tout au long de la réalisation de ce projet. Leur rigueur scientifique et leur soutien technique ont été un moteur essentiel à la réussite de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et d'honorer notre soutenance de leur présence et de leurs remarques constructives.

Nous tenons à saluer chaleureusement l'ensemble du personnel de l'entreprise Sonatrach, et plus particulièrement l'équipe du complexe gazier GP1Z, pour leur accueil, leur coopération et pour nous avoir permis d'effectuer notre stage dans les meilleures conditions possibles.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Dédicaces

Je dédie ce travail avant tout à mon cher père et à ma chère mère, mes premiers enseignants, qui m'ont accompagné du début de mes études jusqu'à ce jour. Leur soutien a été indispensable à l'accomplissement de ce projet. Je les remercie pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leurs prières quotidiennes. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon profond respect et ma gratitude pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Que Dieu vous préserve.

À ma chère sœur et mes chers frères ainsi qu'à mes grands-parents et ma tante, pour leur soutien constant, leur présence et leurs encouragements tout au long de mes études.

À tous mes proches et ma famille.

À mon binôme Nesrine et mes chers amis Lina et Khadîdja et à tous mes fidèles camarades de promotion, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables durant mon parcours universitaire.

À tous ceux qui me sont chers.

Draou Hanaa

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma très chère famille, ma mère ,mon père et mes frères qui ont toujours été à mes côtés par leur amour, leur soutien, leurs sacrifices et leurs encouragements qui m'ont accompagnée durant toutes ces années d'études.

À ma chère grand-mère, à mes tantes ainsi qu'à ma cousine, pour leur affection, leurs conseils et leur soutien précieux.

À ma chère binôme Hanaa ainsi qu'à mes chères amies Lina et Khadidja, pour leur présence, leur soutien, leur amitié sincère et tous les beaux moments partagés au cours de mon parcours universitaire.

Enfin, à toutes les personnes qui me sont chères et qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

Avec toute ma gratitude et mon affection.

Djilali Hamida Nesrine

Résumé

Ce mémoire de fin d'études porte sur la conception et la réalisation d'un système avancé de traçabilité et de visibilité en temps réel pour les opérations logistiques, développé dans le cadre d'un projet appliqué au complexe gazier GP1Z de Sonatrach. Face aux limites des systèmes classiques, notamment le manque de transparence, les zones d'ombre et l'insuffisance de réactivité, ce travail propose une solution technique complète et innovante. Le dispositif matériel est construit autour d'une carte ESP32 TTGO SIM7600 intégrant un modem 4G/LTE et un récepteur GPS. Il est également équipé d'un capteur de température étanche, d'un capteur de vibrations, d'un buzzer d'alarme et d'un relais de coupure automatique. Sur le plan logiciel, le système est programmé à l'aide de l'environnement Arduino IDE. Il collecte les données issues des capteurs, les formate au format JSON et les transmet en temps réel via le protocole MQTT vers la plateforme cloud Adafruit IO. Un tableau de bord intuitif permet la supervision continue des données (position GPS, température, vibrations et alertes SMS), garantissant ainsi une visibilité complète sur les actifs transportés. Ce projet constitue une réponse concrète et moderne aux exigences de la logistique intelligente, en transformant des données brutes en informations décisionnelles exploitables en temps réel.

Mots-clés : Traçabilité, Visibilité en temps réel, IoT, GPS, MQTT, Logistique.

المخلص

تتناول هذه المذكرة تصميم وإنجاز نظام متقدم لتتبع العمليات اللوجستية وتوفير الرؤية والشفافية في الوقت الحقيقي، وذلك في إطار مشروع مطبق على المركب الغازي GP1Z التابع لسوناطراك. ونظرًا للقيود التي تعاني منها الأنظمة التقليدية، والمتمثلة خاصة في نقص الشفافية ووجود مناطق غامضة وضعف سرعة الاستجابة، يقترح هذا العمل حلاً تقنياً متكاملًا ومبتكرًا. يعتمد النظام على لوحة ESP32 TTGO SIM7600 المدمجة مع مودم 4G/LTE ومستقبل GPS، بالإضافة إلى حساس لقياس درجة الحرارة مقاوم للماء، وحساس للاهتزازات، ومنبه صوتي (Buzzer)، ومرحل للفصل التلقائي. على المستوى البرمجي، تمت برمجة النظام باستخدام بيئة Arduino IDE، حيث يقوم بجمع البيانات الصادرة عن الحساسات، وتنسيقها بصيغة JSON، ثم إرسالها في الوقت الحقيقي عبر بروتوكول MQTT إلى منصة Adafruit IO السحابية. كما تتيح لوحة تحكم سهلة الاستخدام مراقبة مستمرة للبيانات، بما في ذلك الموقع الجغرافي، ودرجة الحرارة، والاهتزازات، وتنبيهات الرسائل النصية القصيرة (SMS)، مما يضمن رؤية شاملة للأصول المنقولة. يمثل هذا المشروع حلاً عملياً وعصرياً لمتطلبات اللوجستيات الذكية، من خلال تحويل البيانات الخام إلى معلومات قابلة للاستغلال في اتخاذ القرار بشكل فوري وفي الوقت الحقيقي.

الكلمات المفتاحية: التتبع، الرؤية في الوقت الحقيقي، إنترنت الأشياء (IoT)، نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)، بروتوكول MQTT، اللوجستيات.

Abstract

This final-year dissertation focuses on the design and implementation of an advanced real-time traceability and visibility system for logistics operations, developed as part of a project applied to Sonatrach's GP1Z gas complex. Faced with the limitations of conventional systems, particularly the lack of transparency, blind spots, and insufficient responsiveness, this work proposes a comprehensive and innovative technical solution. The hardware system is built around an ESP32 TTGO SIM7600 board integrating a 4G/LTE modem and a GPS receiver. It is also equipped with a waterproof temperature sensor, a vibration sensor, an alarm buzzer, and an automatic cut-off relay. All components are integrated into an industrial enclosure designed for demanding environments. On the software side, the system is programmed using the Arduino IDE environment. It collects data from the sensors, formats it in JSON format, and transmits it in real time via the MQTT protocol to the Adafruit IO cloud platform. An intuitive dashboard enables continuous monitoring of data, including GPS position, temperature, vibrations, and SMS alerts, thereby ensuring complete visibility of the transported assets. This project provides a practical and modern response to the requirements of smart logistics by transforming raw data into actionable decision-making information available in real time.

Keywords: Traceability, Real-time visibility, IoT, GPS, MQTT, Logistics

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Liste des tableaux et des figures.....	X
Liste des abréviations	XII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Fondements de la logistique, traçabilité et visibilité	
I. Introduction	5
I.1. La logistique.....	5
I.2. La chaîne logistique.....	6
I.2.1. Définition de la chaîne logistique.....	6
I.2.2. Les flux logistiques	7
I.2.2.1. Les flux physiques	7
I.2.2.2. Les flux d'information.....	7
I.2.2.3. Les flux financiers et administratifs	8
I.2.3. Supply Chain Management (SCM)	9
I.2.3.1. Définition de la Supply Chain Management.....	9
I.2.3.2. Processus clés de la gestion de la Supply Chain.....	9
I.2.3.3. Avantages d'une Supply Chain moderne	10
I.3. Les enjeux actuels de la logistique moderne	10
I.3.1. La mondialisation	10
I.3.2. La complexité et l'interconnexion des réseaux	10
I.3.3. Le besoin de visibilité et de traçabilité en temps réel	10
I.4. Limites des systèmes modernes	11
I.5. La traçabilité	12
I.5.1. Définition	12
I.5.2. Type de traçabilité	13
I.5.2.1 La traçabilité amont.....	13
I.5.2. 2. La traçabilité interne.....	14
I.5.2.3. La traçabilité aval	15
I.5.3. Technologie d'identification.....	16

I.5.3.1. Le Code-Barres : L'identification classique	16
I.5.3.2. Le QR Code : Le Code-Barres Intelligent.....	17
I.5.3.3. La RFID (Radio Frequency Identification)	18
I.5.3.4. Le GPS (Global Positioning System)	20
I.6. La visibilité	21
I.7. Quelle est la différence entre la traçabilité et la visibilité ?	22
I.8. Problèmes rencontrés dans les systèmes classiques	23
I.8.1. Manque d'interopérabilité des systèmes	23
I.8.2. Données hétérogènes	24
I.8.3. Retards dans la circulation de l'information	24
 Chapitre II : État de l'art des technologies de traçabilité et visibilité	
II.1. Introduction.....	26
II.2. L'internet des Objets (IoT) : La couche de perception	26
II.2.1. Définition et enjeux de la numérisation physique.....	26
II.2.2. Architecture technique et composants critiques	26
II.3. Le Cloud Computing : La couche d'intelligence centralisée	27
II.3.1. Définition : Le cerveau de la logistique moderne	27
II.3.2. Les trois forces du Cloud pour le transport	28
II.4. Le Fog Computing : La couche de réactivité (bordure)	29
II.4.1. Définition.....	29
II.4.2. L'architecture du Fog Computing :	29
II.5. Le Edge Computing : L'intelligence à la source	30
II.5.1. Un fonctionnement local et rapide	30
II.5.2. Un atout majeur pour la réactivité et la sécurité.....	30
II.6. L'intelligence artificielle (IA) : La couche cognitive	32
II.6.1. Définition de l'intelligence artificielle.....	32
II.6.2. Rôle de l'IA dans la logistique moderne	32
II.6.3. IA et traçabilité en temps réel.....	32
II.6.4. Les limites actuelles	33
II.7. L'internet physique : La couche de standardisation	33
II.7.1. Définition.....	33
II.7.2. Principe de fonctionnement	33
II.7.3. Importance de l'internet physique.....	34

Chapitre III : Conception de système proposé

III.1. Introduction.....	37
III.2. Présentation du cas d'étude	37
III.3. Architecture globale du système	38
III.4. Conception matérielle	41
III.4.1. Contexte général	41
III.4.2. ESP32 TTGO LTE GPS SIM7600	41
III.4.2.1. Les éléments importants de la carte LILYGO T-SIM7600 ESP32	42
III.4.3. Capteur de vibration SW-420	44
III.4.4. Capteur de température DS18B20 étanche	45
III.4.5. Buzzer	46
III.4.6. Relais	46
III.4.7. Les éléments secondaires	47
III.4.7.1. Résistance	47
III.4.7.2. LED.....	48
III.4.7.3. Breadboard et jumpers.....	48
III.4.8. Boîtier étanche	49
III.5. Conception logicielle	49
III.5.1. Introduction à la solution logicielle	49
III.5.2. Environnement de développement : Arduino IDE	49
III.5.2.1. Décomposition de l'Arduino IDE	50
III.5.2.2. Les composants clés de l'interface	50
III.5.3. Développement du micrologiciel (Firmware).....	51
III.5.3.1. Les routes (Protocoles de communication)	51
III.5.3.2. La langue (Format de données).....	51
III.5.4. Protocole de communication et connectivité	52
III.5.4.1. L'architecture : Client et Broker	52
III.5.4.2. Le mécanisme : Publish / Subscribe	52
III.5.4.3. Les avantages clés.....	52
III.5.5. Supervision et visualisation : Adafruit IO	53

Chapitre IV : Réalisation, simulation et validation

IV.1. Introduction	56
IV.2. Réalisation du prototypage	56

IV.2.1. Montage physique et interconnexions.....	56
IV.2.2. Schéma de câblage détaillé	57
IV.2.3. Intégration dans le boîtier industriel étanche	58
IV.3. Logique applicative et Firmware embarqué	58
IV.3.1. Synthèse fonctionnelle	58
IV.3.2. Optimisations logicielles et choix de conception	59
IV.3.2.1. Gestion des tâches asynchrones sans blocage (millis ())	59
IV.3.2.2. Utilisation des interruptions matérielles (ISR)	60
IV.3.2.3. Sécurité anti-spam pour les SMS.....	60
IV.3.2.4. Utilisation de ports Serial customisés	60
IV.3.3. Architecture et Structure du Programme Embarqué	61
IV.3.3.1. Configuration et Initialisation du Système (setup)	61
IV.3.3.2. La boucle principale et gestion temporelle (Loop).....	62
IV.3.3.3. Algorithme de sécurité et protocole d'alerte	63
IV.4. Supervision en temps réel et simulation Cloud	64
IV.4.1. Structuration des flux de données (Feeds)	64
IV.4.2. Analyse du Tableau de Bord du Contrôle	68
IV.5. Résultats expérimentaux et validation énergétique.....	71
IV.5.1. Analyse des données collectées et précision.....	71
IV.5.2. Tests du système d'alerte et de sécurité active.....	74
IV.5.3. Validation des objectifs métiers et techniques.....	75
IV.6. Comparaison avec le système classique	76
IV.7. Conclusion.....	77
Conclusion générale et perspectives	78
Références bibliographiques.....	79

Liste des tableaux et des figures

Tableau I.1 : Résumé comparatif de technologie d'identification.....	21
Tableau I.2 : Comparaison entre la visibilité et 'la traçabilité	23
Tableau II.1 : Comparaison : Edge vs Fog vs Cloud.....	31
Tableau IV.1 : Les branche des matériaux avec l'ESP32.....	57
Tableau IV.2 : Test des scenarios	74
Tableau IV.3 : Validation des objectifs techniques	75
Figure I. 1 : Les type de la chaîne d'approvisionnement [9].....	8
Figure I. 2 : Supply Chain management [10].....	9
Figure I. 3: La traçabilité amont garantit la conformité des aliments [18].....	14
Figure I. 4: La traçabilité externe suit le produit après sa sortie de l'entrepôt [18].....	16
Figure I. 5: Structure de SSCC [19].....	17
Figure I. 6: RFID system [22].....	18
Figure I. 7: Le lecteur et l'étiquette (transpondeur) RFID [23].....	19
Figure I. 8: RFID passive [23].....	19
Figure I. 9: Manque d'interopérabilité [28].....	23
Figure II. 1: Cloud computing [34]	28
Figure II. 2: Edge Computing (Traitement à la source) [40]	30
Figure II. 3: Schémas des trois couches dans l'architecture d'une application Cloud[44]	32
Figure II. 4: La fragmentation des livraisons et des faibles taux de chargement.[49]	35
Figure II. 5: Contribution de l'Internet Physique à la maximisation du taux de remplissage des différents modes de transport.[49].....	35
Figure III. 1: schémas globale simplifié de notre système.	38
Figure III. 2: Architecture globale d'un système de traçabilité et de visibilité	40
Figure III. 3: ESP 32 SIM7600 [50].....	41
Figure III. 4: GPS et l'antenne [50]	42
Figure III. 5 : la structure de E/S d'ESP32 SIM [50].....	43
Figure III. 6 : capteur de vibration SW-420.....	44
Figure III. 7 : SW-420 Vibration Sensor Module Pin out [51]	45
Figure III. 8: capteur de température.....	45
Figure III. 9: buzzer [53].....	46
Figure III. 10 : relais [55].....	47
Figure III. 11 : résistance de 4.7 k Ohm.....	47
Figure III. 12 : LED [56].....	48
Figure III. 13 : fils femelle male et breadboard.....	48
Figure III. 14 : Arduino IDE	50
Figure III. 15 : Architecture de MQTT. [22]	53
Figure III. 16 : Page d'acquisition du Adafruit IO sur le smartphone.....	53

Figure III. 17 : Un compte sur Adafruit IO	54
Figure IV. 1 : câblage final assemblé.....	57
Figure IV. 2 : les données output in serial monitor	59
Figure IV. 3 : le programme de setup	62
Figure IV. 4 : code des anomalies	63
Figure IV. 5 : script de SMS alerte sue Arduino IDE	64
Figure IV. 6 : affichage des résultats sur la série	64
Figure IV. 7 : les groupes et les flux SUR Adafruit IO.....	65
Figure IV. 8 : affichage des cordonné de la localisation.....	65
Figure IV. 9 : historique et la courbe d'historique de la température	66
Figure IV. 10 : Historique et la courbe d'historique des valeurs du vibration	66
Figure IV. 11 : Historique des alertes	67
Figure IV. 12 : Historique des valeurs du vitesse.....	67
Figure IV. 13 : liste des Dashboard DE supervision des camions	68
Figure IV. 14 : Affichage OpenStreetMap via la plateforme Adafruit IO	68
Figure IV. 15 : Trajet de marche d'un être humain	69
Figure IV. 16 : Affichage du la valeur de température par heure.....	69
Figure IV. 17 : Affichage de l'intensité	70
Figure IV. 18 : Affichage d'une alerte de température et une autre d'une vibration élevée....	70
Figure IV. 19 : Alerte de la limite de zone.....	71
Figure IV. 20 : La valeur de la vitesse sur le Dashboard de camion 1	71
Figure IV. 21 : L'interface de contrôle développée sur Adafruit IO.	72
Figure IV. 22 : SMS envoyé au chauffeur de 'camion 1'	74

Liste des abréviations

Abréviation	Signification en Anglais (et en Français)
AI (IA)	Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)
API	Application Programming Interface (Interface de Programmation d'Application)
DC	Direct Current (Courant Continu)
DS18B20	Dallas Semiconductor 18B20 Digital Temperature Sensor (Capteur de température numérique DS18B20)
ESP32	Espressif Systems 32-bit Microcontroller (Microcontrôleur 32 bits d'Espressif Systems)
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrées/Sorties à usage général)
GPRS	General Packet Radio Service (Service général de radiocommunication par paquets)
GPS	Global Positioning System (Système de géolocalisation par satellite)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Système global de navigation par satellite)
GS1	Global Standards One (Organisation mondiale de normalisation des échanges professionnels)
HMI (IHM)	Human-Machine Interface (Interface Homme-Machine)
HTTP	HyperText Transfer Protocol (Protocole de transfert hypertexte)
IDE	Integrated Development Environment (Environnement de développement intégré)
IoT	Internet of Things (Internet des Objets)
ISR	Interrupt Service Routine (Routine de service d'interruption)
JSON	JavaScript Object Notation (Notation d'objet JavaScript)
KPI	Key Performance Indicator (Indicateur clé de performance)
LED	Light Emitting Diode (Diode Électroluminescente)
LILYGO	LILYGO (Manufacturer of development boards / Fabricant de cartes de développement)
LM393	LM393 Dual Voltage Comparator (Comparateur de tension double LM393)
LNG (GNL)	Liquefied Natural Gas (Gaz Naturel Liquéfié)
LTE	Long-Term Evolution / 4G (Évolution à long terme / Réseau mobile 4G)
MPU6500	Motion Processing Unit 6500 Inertial Sensor (Capteur inertiel / Unité de traitement des mouvements 6500)

MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (Protocole réseau de télémessure pour l'IoT)
NIST	National Institute of Standards and Technology (Institut national des normes et de la technologie)
PCB	Printed Circuit Board (Circuit imprimé)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation d'impulsion en largeur / MLI)
QR (Code)	Quick Response Code (Code à réponse rapide)
RAM	Random Access Memory (Mémoire vive)
REST	Representational State Transfer (Style d'architecture logicielle pour les API web)
RFID	Radio Frequency Identification (Identification par radiofréquence)
RX / TX	Receive / Transmit (Réception / Émission)
SAP	Systems, Applications & Products in Data Processing (Progiciel de gestion intégré / ERP)
SCM	Supply Chain Management (Gestion de la chaîne logistique)
SIM7600	SIMCom SIM7600 4G LTE Cellular Module (Module modem cellulaire 4G LTE de chez SIMCom)
SMS	Short Message Service (Service de messages courts / Texto)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface périphérique série)
SSCC	Serial Shipping Container Code (Code séquentiel du colis / Numéro unique d'immatriculation logistique)
SW-420	SW-420 Vibration Sensor (Capteur de vibration modèle SW-420)
TCP	Transmission Control Protocol (Protocole de contrôle de transmission)
TQM	Total Quality Management (Gestion de la qualité totale)
TTGO	TTGO (Lilygo's ESP32-based development board series / Série de cartes de développement ESP32 par LILYGO)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Émetteur-récepteur asynchrone universel)
USB	Universal Serial Bus (Bus informatique en série universel)
GP1Z	GP1Z Sonatrach Gas Complex - Zone 1 (Complexe Gazier de Sonatrach - Zone 1)

Introduction générale

1. Le nouveau visage de la logistique : l'exigence du "tout, tout de suite"

Il y a encore quelques années, la logistique était une fonction de l'ombre, une simple affaire de camions et d'entrepôts dont on ne parlait que lorsque quelque chose ne fonctionnait pas. Mais aujourd'hui, elle est passée au premier plan. Pourquoi ? Parce que nos modes de vie ont changé. En un clic sur notre smartphone, nous pouvons déclencher une commande à l'autre bout du monde et exiger qu'elle arrive chez nous en moins de 24 heures.

Cette rapidité incroyable a transformé la logistique en un moteur essentiel de notre économie. Ce n'est plus seulement une question de déplacer des cartons d'un point A à un point B. C'est devenu une science complexe qui doit jongler entre le stockage, le transport et surtout une circulation permanente d'informations. Pour une entreprise moderne, la logistique est son image de marque : un retard, un colis perdu ou un produit abîmé, et c'est la confiance du client qui s'envole. Pour rester compétitives, les entreprises n'ont plus le choix : elles doivent supprimer chaque erreur et maîtriser chaque seconde du trajet de leurs marchandises [1].

2. La traçabilité : l'historique nécessaire, mais insuffisant

Pour relever ce défi, le premier outil que les entreprises ont utilisé est la traçabilité. On peut comparer cela à une carte d'identité du produit qui s'enrichit à chaque étape. Elle est devenue obligatoire pour des raisons de sécurité (par exemple pour la nourriture ou les médicaments) et pour garantir la qualité. Grâce à elle, on peut savoir qui a fabriqué le produit, quand il a quitté l'usine et par quel entrepôt il est passé.

Cependant, la traçabilité classique a un défaut majeur : elle est souvent statique. Elle nous dit ce qui s'est passé dans le passé. C'est un peu comme regarder dans le rétroviseur d'une voiture : on voit très bien le chemin parcouru, mais on ne voit pas l'obstacle qui se dresse juste devant nous. Dans un marché où tout change à chaque seconde, savoir qu'un colis a été scanné il y a six heures ne nous aide pas si le camion est actuellement en panne sur le bord de la route.

3. La révolution du temps réel : passer de la réaction à l'action

C'est ici qu'intervient une véritable révolution : la visibilité en temps réel. La visibilité offre une fenêtre ouverte sur ce qui se passe à l'instant même. C'est la différence majeure entre recevoir un rapport le lendemain d'un incident et pouvoir agir au moment précis où il survient.

Grâce aux capteurs connectés (IoT) et aux balises GPS de nouvelle génération, les entreprises peuvent désormais voir l'invisible. Pour comprendre l'importance cruciale de cette technologie, prenons l'exemple frappant du camion de KitKat qui a été volé avec toute sa marchandise [2]. Dans cette affaire, l'absence de balises GPS ou de tout autre système de localisation performant a rendu la récupération du véhicule et de sa cargaison totalement impossible. Cet incident confirme l'urgence de notre projet et la nécessité absolue du suivi intelligent (Smart Tracking). En raison de ce manque de technologie, l'entreprise a été incapable de réagir à temps et a subi des pertes financières colossales.

Cette transparence totale change radicalement la donne. On ne se contente plus de constater les dégâts une fois le camion arrivé (ou disparu) ; on surveille en direct sa position, mais aussi son état de santé (température pour les produits sensibles, chocs ou ouverture suspecte des portes). En supprimant ces zones d'ombre, la logistique n'est plus une fonction passive qui subit les événements, elle devient une discipline intelligente, capable d'anticiper les menaces et de protéger la valeur qu'elle transporte [3].

4. Présentation du projet : construire un système sans zones d'ombre

C'est précisément dans ce passage vers une logistique connectée que s'inscrit notre projet de fin d'études. On se rend compte aujourd'hui que le plus gros problème de la chaîne de transport, ce sont les zones d'ombre : ces moments où l'on ne sait pas où est la marchandise ni dans quel état elle se trouve.

Notre travail porte sur la « **conception d'un système avancé de traçabilité et de visibilité en temps réel pour les opérations logistiques** ». L'objectif de ce projet est de concevoir une solution technique complète et moderne. Il s'agit de créer un outil capable de récolter des données sur le terrain et de les transformer en informations utiles pour les décideurs. En supprimant les incertitudes, nous voulons garantir une gestion plus fluide, plus sécurisée et surtout plus efficace. À travers ce projet, notre but est :

-D'éliminer les zones d'ombre, en garantissant le produit, la sécurité et la réactivité immédiate face aux risques opérationnels.

-D'avoir une visibilité totale pas seulement une archive.

Afin de répondre à cette problématique, ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

- Le premier chapitre pose les fondements théoriques de notre étude en présentant les concepts essentiels de la logistique moderne, du Supply Chain Management et de la traçabilité.
- Le deuxième chapitre explore les technologies de visibilité en temps réel, en mettant l'accent sur les solutions issues de l'Internet des Objets. Il examine l'architecture réseau (du Edge au Cloud) et l'apport de l'intelligence artificielle pour transformer les données de terrain en décisions stratégiques et prédictives.
- Le troisième chapitre est dédié à la conception technique, à la fois matérielle et logicielle, du système proposé. Il définit l'architecture du dispositif embarqué (autour de la carte ESP32), l'intégration des différents capteurs et actionneurs de sécurité active, ainsi que la configuration des protocoles de communication pour la remontée des flux de données.

- Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la réalisation pratique du prototype, à son implémentation logicielle et aux expérimentations concrètes sur le terrain. Cette section présente le déploiement du tableau de bord de supervision ainsi que l'analyse des résultats obtenus lors des simulations de scénarios critiques.

Chapitre I :

Fondements de la logistique, traçabilité et visibilité

I. Introduction

Pour faire simple, ce chapitre raconte comment la logistique est passée d'une vieille méthode militaire à une science numérique ultraprécise. On y découvre que gérer des marchandises aujourd'hui, c'est surtout savoir maîtriser l'information en temps réel. L'idée, c'est de montrer comment la traçabilité et les outils connectés transforment une chaîne complexe en un système transparent et réactif. En gros, on passe du simple transport à une intelligence globale pour éviter les erreurs du passé.

I.1. La logistique

La logistique c'est l'art de l'organisation parfaite. Son but est de s'assurer qu'un client reçoive le bon produit, au bon moment, au bon endroit, et surtout, sans que cela coûte une fortune ou que le produit arrive abîmé.

Mais la logistique n'est pas devenue cette science complexe du jour au lendemain. Elle a parcouru un très long chemin, que l'on peut découper en quatre grandes étapes pour mieux comprendre où nous en sommes aujourd'hui.

Tout a commencé sur le champ de bataille (L'héritage militaire), au tout début, la logistique n'avait rien à voir avec le commerce. C'était une question de vie ou de mort pour les armées. Le mot vient d'ailleurs du terme logis : il fallait loger, nourrir et équiper les soldats en déplacement.

Un général pouvait avoir la meilleure stratégie du monde, si ses soldats n'avaient plus de munitions, plus de nourriture ou plus de carburant pour leurs véhicules, la guerre était perdue d'avance. La logistique était donc le bras droit de la stratégie militaire. Son rôle était clair : mettre tout le matériel nécessaire à disposition pour que les décisions des chefs puissent être appliquées sur le terrain, sans aucune faille. C'est là qu'on a appris l'importance d'être au bon endroit et au bon moment.

L'arrivée dans les usines (Les années 70), après les grandes guerres, ces méthodes d'organisation ont commencé à intéresser le monde de l'industrie. Pourtant, jusque dans les années 70, la logistique restait le parent pauvre de l'entreprise. On la voyait comme une tâche un peu ingrate et secondaire. Les patrons s'occupaient de vendre et de fabriquer, et la logistique servait juste à ranger les cartons dans un coin de l'entrepôt ou à les charger dans des camions [4].

Le grand changement est venu de l'industrie automobile. Les constructeurs se sont rendu compte que pour fabriquer des voitures par milliers, il fallait une organisation impeccable des pièces détachées. Comme l'ont expliqué les chercheurs Tixier, Mathe et Colin, c'est à ce moment-là qu'on a réalisé que la logistique n'était pas juste une dépense, mais un vrai moyen de mieux servir le client et de rendre l'entreprise plus efficace[5].

-La logistique devient une priorité ; dans les années 80, on change de dimension. Les entreprises comprennent qu'il ne suffit plus de fabriquer un bon produit, il faut aussi être capable de le livrer plus vite que son concurrent. La logistique sort de l'ombre et devient un élément central [4].

On ne se contente plus de stocker des marchandises en attendant qu'elles se vendent (car stocker coûte cher). On cherche désormais la fluidité. Le but est de faire circuler les produits sans qu'ils s'arrêtent, du fournisseur jusqu'au client, comme une rivière qui coule. C'est l'époque où l'on commence à traquer les coûts inutiles et à faire de la qualité de service une priorité absolue. Si le produit n'est pas là quand le client le veut, l'entreprise perd de l'argent.

-La logistique moderne ; depuis le milieu des années 90, avec l'arrivée d'Internet et de la mondialisation, la logistique est devenue une science de pointe. On ne gère plus seulement un trajet entre deux villes, mais une chaîne immense qui fait le tour de la planète. C'est ce qu'on appelle la Supply Chain Management [4].

Aujourd'hui, c'est un mélange de technologie, d'informatique et d'organisation humaine. Pour bien comprendre cette idée, l'American Marketing Association explique que la logistique englobe tout ce qui se passe pendant qu'un produit voyage de l'usine jusqu'aux mains du consommateur, y compris tous les services qui vont avec [6].

En résumé, la logistique est passée d'un simple soutien aux soldats à un système intelligent capable de suivre des millions de colis en temps réel. C'est ce besoin de précision totale qui explique pourquoi, aujourd'hui, nous avons besoin d'outils de suivi ultra-performants pour éviter les erreurs du passé.

Les 5 piliers de la logistique (les 5R)

On peut résumer la logistique par la règle des 5R (en anglais) ou des 5B (en français) :

1. Le Bon Produit (Right Product)
2. La Bonne Quantité (Right Quantity)
3. Le Bon État (Right Condition)
4. Le Bon Endroit (Right Place)
5. Le Bon Moment (Right Time)

I.2. La chaîne logistique

I.2.1. Définition de la chaîne logistique

La chaîne logistique, ou Supply Chain, présente l'ensemble des processus impliqués dans la production et la livraison d'un produit ou d'un service, depuis la matière première jusqu'au client final.

Elle réunit plusieurs acteurs et activités permettant d'assurer la circulation des marchandises tout au long de leur cycle de vie.

Elle comprend notamment :

-La gestion des achats (approvisionnement en matières premières, relations fournisseurs, suivi des commandes)

-L'optimisation des stocks (gestion des niveaux de stock, contrôle qualité)

-L'organisation des livraisons (transport, préparation des commandes, distribution et gestion des retours)

Ainsi, la chaîne logistique vise à assurer une coordination efficace des flux afin de garantir la disponibilité des produits, tout en optimisant les coûts et les délais [7].

I.2.2. Les flux logistiques

L'un des principaux risques de la Supply Chain est de gérer sûrement les différents flux afin de trouver un bon équilibre entre les coûts d'approvisionnement, les coûts de transport et les délais de livraison. Une chaîne logistique efficace repose ainsi sur la coordination de 3 types de flux : les flux physiques, les flux d'information et les flux financiers et administratifs.

I.2.2.1. Les flux physiques

Les flux physiques correspondent à tous les déplacements réels de produit au sein de la chaîne logistique, depuis les fournisseurs jusqu'au client final. Ils couvrent l'ensemble des opérations liées à l'approvisionnement, à la production, au stockage, à la manutention et au transport.

Ils comprennent notamment :

Le transport des matières premières vers les sites de production.

- Le déplacement des produits en cours de fabrication
- Le stockage des marchandises dans les entrepôts.
- La distribution des produits finis vers les clients.

La gestion de ces flux a pour objectif d'assurer la disponibilité des produits au bon endroit, au bon moment, en quantité suffisante et avec la qualité prévue. Elle permet également de maîtriser les coûts liés au transport et au stockage [8].

I.2.2.2. Les flux d'information

Les entreprises disposent une grande quantité de données issues de différentes sources Avec le développement du Big Data et des systèmes d'information comme :

- Les historiques de ventes et les mouvements de stock
- Les informations relatives aux fournisseurs et partenaires logistiques.
- Les politiques et stratégies de gestion.
- Les ressources et moyens mobilisés.

Ces flux jouent un rôle important dans la prise de décision, notamment pour anticiper les besoins, gérer les stocks et organiser les livraisons.

Le principal défi reste la capacité à collecter, traiter et partager ces informations de manière rapide et crédible. Cela nécessite des systèmes d'information performants capables de garantir

une bonne intégration et une synchronisation en temps réel entre tous les acteurs dans la chaîne [8].

I.2.2.3. Les flux financiers et administratifs

Les flux financiers et administratifs regroupent l'ensemble des transactions et des documents échangés entre les différents acteurs de la supply chain dans le cadre des opérations commerciales.

Ils concernent principalement :

- Le traitement des commandes.
- Le suivi et le contrôle des livraisons.
- La gestion des factures et des paiements.
- Le suivi des contrats commerciaux.
- Les documents et rapports administratifs.

Ces flux permettent d'assurer la coordination financière entre les acteurs et de garantir le respect des engagements contractuels.

Il est critique que ces opérations soient réalisées avec précision et dans les délais afin d'éviter tout dysfonctionnement [8].

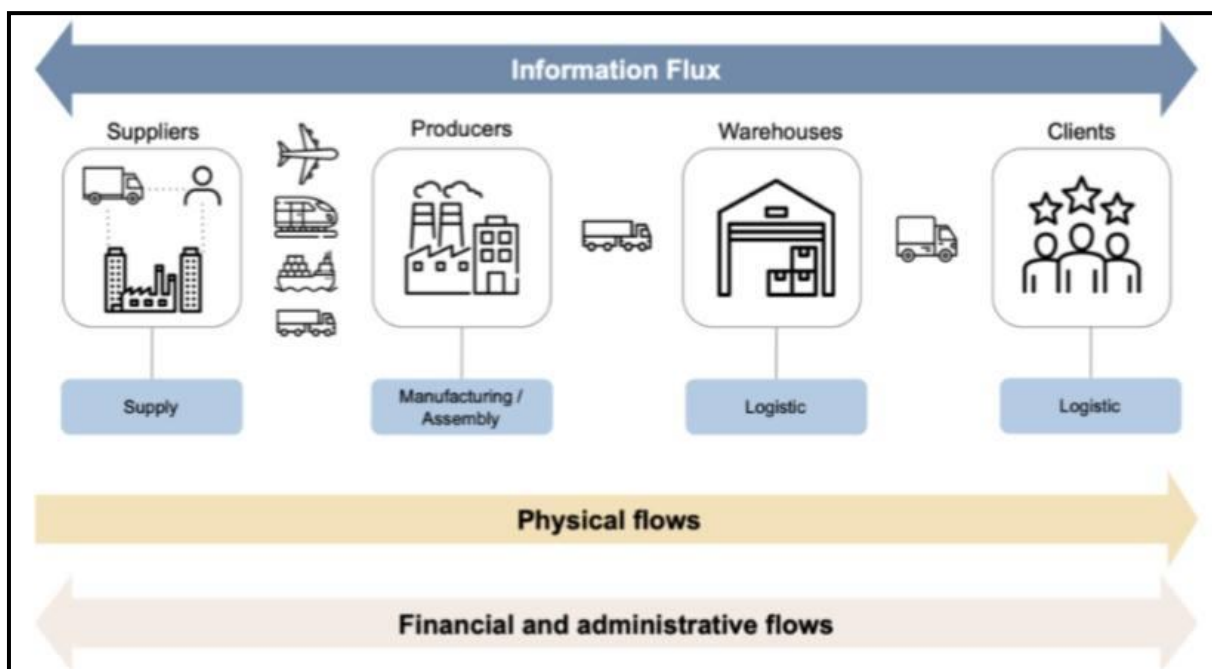


Figure I. 1 : Les type de la chaîne d'approvisionnement [9]

I.2.3. Supply Chain Management (SCM)

I.2.3.1. Définition de la Supply Chain Management

La Supply Chain Management regroupe l'ensemble des activités liées à la planification, à l'organisation et au pilotage des trois flux, depuis le sourcing et la conception jusqu'à la production, le stockage, le transport et la distribution.

L'objectif principal de la SCM est d'optimiser l'efficacité globale de la supply chain, en garantissant une réduction des coûts, une bonne qualité des produits, et une satisfaction idéale des clients[10].

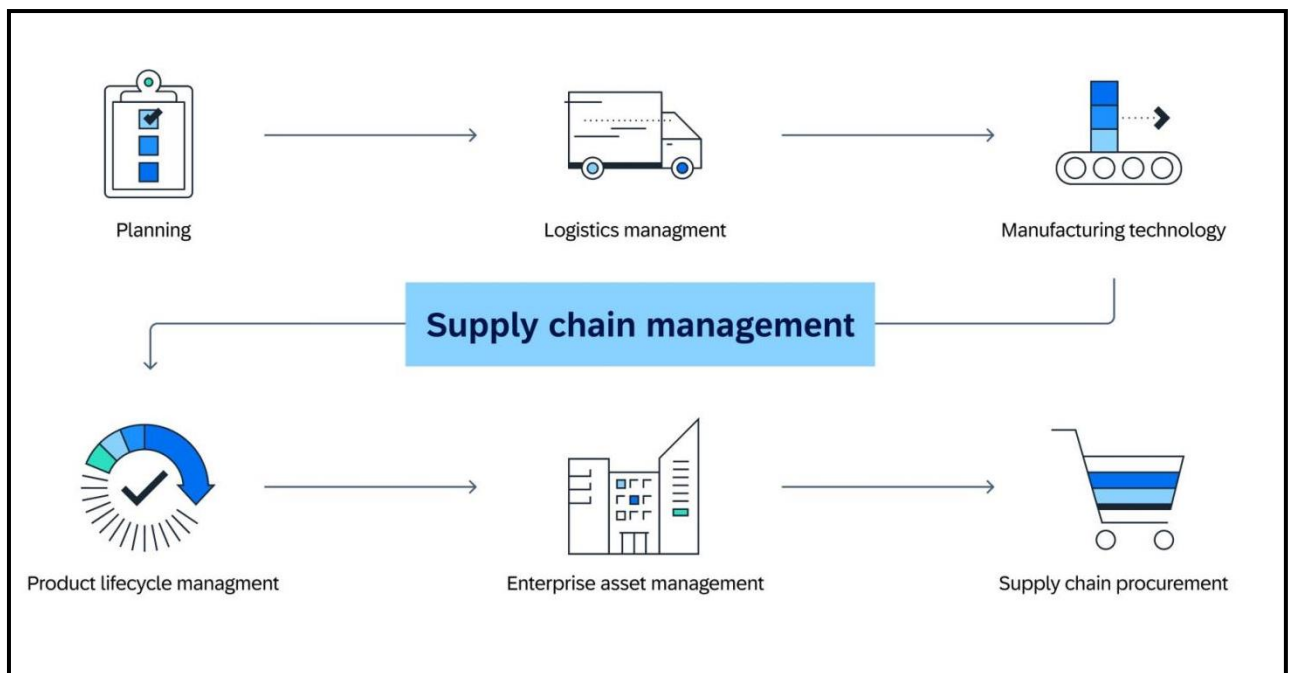


Figure I. 2 : Supply Chain management [10]

I.2.3.2. Processus clés de la gestion de la Supply Chain

La SCM s'appuie sur multiples processus primordiales :

- Planification : prévision de la demande et organisation des ressources.
- Gestion du cycle de vie produit : suivi du produit de sa conception jusqu'à sa fin de vie.
- Approvisionnement : appropriation des matières premières et gestion des fournisseurs.
- Logistique : transport, stockage et distribution des produits.
- Production : pilotage et optimisation des opérations de fabrication
- Gestion des actifs : maintenance et suivi des équipements.

Ces processus sont fortement digitalisés à cause des technologies différentes tel que l'IoT et les systèmes intelligents [10].

I.2.3.3. Avantages d'une Supply Chain moderne

Une gestion optimisée de la chaîne logistique offre des avantages nombreuses tel que :

- Amélioration de la productivité grâce à l'automatisation et à la maintenance prédictive.
- Réduction des coûts en limitant les stocks futiles.
- Renforcement de la flexibilité et de la résilience face aux inattendus.
- Amélioration de la qualité des produits grâce à une meilleure utilisation des données.
- Amélioration du service client avec des offres personnalisées et réactives [10].

I.3. Les enjeux actuels de la logistique moderne

La logistique a beaucoup changé ces dernières années. Aujourd'hui, les entreprises cherchent à maîtriser des systèmes d'information ultra-rapides plutôt qu'à simplement transporter des produits. Voici les trois grands défis actuels :

I.3.1. La mondialisation

La mondialisation a rendu la circulation des produits plus rapide et plus globale. Les distances sont de plus en plus longues et les pays sont tous connectés entre eux. Cependant, cette ouverture mondiale rend les chaînes de transport plus fragiles face aux crises (conflits, météo, pannes géantes). Le grand défi n'est plus seulement de trouver le chemin le moins cher, mais de créer une chaîne capable de résister aux imprévus.

La capacité d'une entreprise à être réactive et à s'adapter rapidement aux changements du marché est devenue son principal avantage sur ses concurrents [1]. Pour une zone stratégique comme GP1Z, cela signifie garantir que le gaz arrive à destination malgré les tensions mondiales.

I.3.2. La complexité et l'interconnexion des réseaux

La logistique était une ligne droite simple. Aujourd'hui, c'est devenu un réseau numérique où des dizaines d'acteurs (fournisseurs, transporteurs, douanes, clients) doivent travailler ensemble en même temps cela permet de créer une complexité énorme : il y a trop de données à gérer et les risques d'erreurs augmentent à chaque étape. Selon S. Chopra et P. Meindl [11], cette complexité moderne exige une intégration des informations. Les entreprises ne peuvent plus travailler seules ; elles doivent utiliser des outils numériques pour que tous les partenaires voient la même information au même moment, évitant les retards coûteux.

I.3.3. Le besoin de visibilité et de traçabilité en temps réel

C'est l'enjeu le plus important pour Industrie 4.0. Il faut savoir exactement où il est le produit, à quelles conditions il se trouve et s'il arrive à l'heure souhaitée, le tout via un écran.

Cette visibilité permet de passer d'une gestion passive, où on subit les problèmes à une gestion proactive où on prévoit les problèmes avant qu'ils n'arrivent.

La visibilité en temps réel constitue aujourd'hui un pilier fondamental de la logistique moderne. Elle permet de diminuer les gaspillages et les coûts, tout en améliorant la sécurité des opérations, un aspect crucial pour le transport de produits sensibles tels que le gaz liquéfié [12].

I.4. Limites des systèmes modernes

Pourtant les progrès technologiques et la digitalisation croissante de la chaîne logistique, ils présentent actuellement encore plusieurs limites essentielles. Ces contraintes sont principalement liées à la mondialisation des échanges, à la complexité des réseaux logistiques ainsi qu'à une visibilité encore insuffisante sur l'ensemble de la chaîne.

Fragilité des réseaux logistiques mondiaux

La mondialisation a permis d'étendre les chaînes logistiques à l'échelle internationale, facilitant l'accès aux ressources et réduisant certains coûts de production. Cependant, cette expansion a aussi rendu les Supply Chains plus sensibles aux perturbations [13].

D'après plusieurs études en gestion des risques logistiques, cette fragilité s'explique notamment par :

- L'instabilité géopolitique.
- Les perturbations logistiques.
- La variabilité de la demande.
- Les aléas climatiques.

Ces composants peuvent provoquer des ruptures dans la chaîne logistique et entraînant des retards.

Complexité et interconnexion des réseaux logistiques

- D'après Ivanov et Nguyen, la Supply Chain doit être considérée comme un réseau à plusieurs niveaux, où chaque acteur dépend étroitement des autres.

Cette forte interconnexion provoque plusieurs difficultés :

- Une coordination difficile entre fournisseurs, producteurs et distributeurs
- Une dépendance importante entre les différents anneaux de la chaîne.
- Un risque d'effet domino, où un problème local peut affecter tout le réseau.

Ainsi, cette complexité accrue renforce la vulnérabilité globale du système [14].

Manque de visibilité

Le manque de visibilité reste l'un des principaux obstacles des systèmes logistiques modernes. Il apparaît lorsque les informations échangées entre les différentes actions de la chaîne sont incomplètes, retardées ou mal synchronisées.

Dans de nombreuses entreprises, les données sont encore fragmentées entre plusieurs systèmes ou partenaires, créant des silos d'information.

Cette situation peut entraîner :

- Des réactions retard face aux perturbations.
- Des incohérences entre les différentes sources de données.
- Une traçabilité insuffisante des produits dans l'ensemble de la chaîne.

Selon les travaux de Simchi-Levi, cette faible visibilité limite profondément la capacité des entreprises à prendre des décisions rapides et efficaces [15].

I.5. La traçabilité

I.5.1. Définition

La Traçabilité : La mémoire vive de nos produits, c'est la capacité de suivre un produit à la trace. Cela commence dès l'instant où le produit est créé jusqu'au moment où il arrive entre les mains de celui qui l'a commandé.

La traçabilité nous donne le pouvoir de répondre avec précision à trois questions vitales :

1. D'où vient le produit ?
2. Où est-il passé ?
3. Où est-il maintenant ?

C'est cette mémoire qui nous rassure. Si demain un produit a un problème, on peut retrouver exactement quel jour et dans quelle usine il a été fabriqué pour comprendre ce qui s'est passé.

La fin des dossiers papier, Pendant très longtemps, on faisait cela à l'ancienne. Les employés devaient remplir de gros registres papier, noter des numéros de série à la main et ranger des montagnes de dossiers dans des archives poussiéreuses. Vous imaginez bien le problème, une erreur de stylo, un dossier perdu ou une écriture illisible, et toute la chaîne de confiance s'écroulait [16], [17].

Les outils modernes, on utilise des outils numériques pour que tout s'enregistre presque tout seul :

- **Les codes-barres et QR codes** : D'un simple coup de scan, l'ordinateur sait immédiatement quel est le produit et met à jour son statut.
- **Les puces RFID** : C'est encore plus fort. Ces petites puces permettent de détecter un produit à distance, sans même avoir besoin de le sortir de sa boîte.

Grâce à ces innovations, chaque mouvement du produit est envoyé directement dans une base de données informatique. On ne risque plus l'erreur humaine ou l'oubli. Le suivi devient fluide, automatique et surtout, infalsifiable. Pour les entreprises, c'est un gain de temps énorme, mais

c'est surtout une garantie de sécurité totale pour le consommateur : on sait tout, tout le temps, sans l'ombre d'un doute.

-En résumé, la traçabilité moderne, c'est passer d'une vieille archive papier qu'on consulte après coup à un système numérique vivant qui nous dit la vérité sur chaque produit en un instant.

I.5.2. Type de traçabilité

La chaîne logistique moderne repose sur la capacité des entreprises à assurer une visibilité complète sur les produits tout au long de leur cycle de vie. Dans ce contexte, la traçabilité constitue un élément fondamental du Supply Chain Management (SCM), permettant d'identifier, de suivre et de documenter le parcours d'un produit depuis son origine jusqu'au client final.

Selon les normes internationales, la traçabilité est définie comme la capacité à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'un produit grâce à des identifications enregistrées.

Ainsi, on distingue principalement quatre types de traçabilité : amont, interne, aval et externe.

I.5.2.1 La traçabilité amont

La traçabilité amont correspond au suivi d'un produit depuis sa source d'origine jusqu'à son entrée dans l'entreprise. Elle permet d'identifier l'ensemble des acteurs impliqués en amont, notamment les fournisseurs, les matières premières utilisées et les conditions de fabrication. Concrètement, elle repose sur l'enregistrement d'informations telles que :

- L'origine des matières premières.
- Les fournisseurs et sous-traitants.
- Les numéros de lot.
- Les dates de réception et de production.
- Les contrôles qualité effectués.

La littérature scientifique montre que cette forme de traçabilité est essentielle pour :

- Garantir la sécurité et la qualité des produits.
- Permettre le retrait rapide des produits défectueux.
- Assurer la conformité réglementaire.
- Renforcer la transparence et la confiance des consommateurs.

Dans l'industrie agroalimentaire, par exemple, la traçabilité amont permet d'identifier rapidement la source d'un contaminant et de limiter les risques pour la santé publique [18].



Figure I. 3: La traçabilité amont garantit la conformité des aliments [18]

I.5.2. 2. La traçabilité interne

La traçabilité interne concerne le suivi des produits et des matières premières à l'intérieur de l'entreprise, durant toutes les étapes de transformation et de stockage.

Elle couvre :

- la production et la transformation des produits.
- les mouvements internes en entrepôt.
- les opérations de conditionnement et d'assemblage.
- la gestion des stocks et des emplacements.

Elle permet de reconstituer précisément le processus de fabrication, en indiquant :

- les quantités utilisées.
- les étapes de transformation.
- les résultats de production.
- les flux internes de marchandises.[18]

Importance :

Selon plusieurs études en gestion industrielle, la traçabilité interne contribue à :

- Améliorer la qualité des processus (approche TQM).
- Réduire les pertes et les erreurs de production.
- Optimiser la gestion des stocks.
- Renforcer la performance opérationnelle globale.

I.5.2.3. La traçabilité aval

La traçabilité aval correspond au suivi des produits après leur sortie de l'entreprise, jusqu'au client final. Elle inclut :

- L'identification des clients et distributeurs.
- Le suivi des expéditions et livraisons.
- Les numéros de lot distribués.
- Les dates d'expédition et de livraison.
- Les conditions de transport.

Objectifs principaux :

- Assurer la sécurité du consommateur final.
- Permettre les rappels de produits.
- Améliorer la gestion de la distribution.
- Renforcer la visibilité sur les circuits logistiques.

Dans la littérature SCM, la traçabilité aval est considérée comme un élément clé de la gestion des risques et de la qualité, notamment dans les secteurs sensibles comme l'agroalimentaire et la pharmacie [18].

I.5.2.4. La traçabilité externe

La traçabilité externe concerne le suivi des produits une fois qu'ils quittent le périmètre direct de l'entreprise, notamment pendant le transport et la distribution par des prestataires logistiques. Elle repose sur :

- Les informations des transporteurs.
- Les itinéraires de livraison.
- Les délais de transport.
- Le suivi des colis en temps réel.
- Les preuves de livraison.

La traçabilité externe permet de :

- Assurer la visibilité sur toute la chaîne logistique étendue.
- Améliorer la coordination entre partenaires logistiques.
- Réduire les retards et erreurs de livraison.
- Renforcer la satisfaction client. [18]



Figure I. 4: La traçabilité externe suit le produit après sa sortie de l'entrepôt [18]

I.5.3. Technologie d'identification

I.5.3.1. Le Code-Barres : L'identification classique

Le Code-barres, c'est le contenant (la langue), c'est juste la technologie d'affichage, veut dire le dessin des barres noires et blanches qui permet à une machine de lire une information.

C'est l'outil qui sert à écrire pour les scanners.

Le SSCC « Serial Shipping Container Code », c'est le contenu (le message) qui contient le numéro d'identification unique que l'on décide de mettre à l'intérieur du code-barres, une suite de 18 chiffres qui ne concerne que les unités de transport (palettes, conteneurs, gros colis).

Un SSCC n'est pas une suite de chiffres au hasard. Il est composé de 4 parties précises qui garantissent qu'aucune autre palette sur Terre ne porte le même numéro :

1. L'identifiant GS1 : C'est le préfixe qui annonce : Attention, ce qui suit est un SSCC.
2. Le caractère d'extension : Un chiffre (de 0 à 9) que l'entreprise choisit librement. C'est très pratique pour multiplier par dix ses capacités de numérotation ou pour différencier ses usines.
3. Le Préfixe Entreprise + Le Numéro Séquentiel : C'est le cœur du code. Le préfixe identifie votre entreprise (attribué par l'organisme GS1), et le numéro séquentiel identifie chaque colis spécifique. Ce numéro doit rester unique pendant au moins un an chez l'expéditeur.
4. La clé de contrôle : C'est le dernier chiffre. Il est calculé par un algorithme pour vérifier que l'ensemble du code a été bien lu. Si un seul chiffre est faux, le scanner bipera pour signaler une erreur [19].



Figure I. 5: Structure de SSCC [19]

- **Fonctionnement :** un lecteur laser passe sur les barres, il mesure la façon dont la lumière est réfléchiée. Les barres noires absorbent la lumière, les espaces blancs la renvoient. C'est ce contraste qui permet d'identifier le produit instantanément, sans erreur de saisie manuelle.
- **Exemple GP1Z :** Identification des petits équipements ou des pièces de rechange au dépôt.

En résumé, le code-barres et le SSCC sont les outils qui permettent de mettre de l'ordre et de la confiance dans chaque livraison.

On dit souvent que GS1 a révolutionné le monde le 26 juin 1974. Ce jour-là, aux États-Unis, pour la toute première fois, un paquet de chewing-gums a été scanné dans un magasin grâce à un code-barres GS1. C'était le début de la logistique moderne ![20].

I.5.3.2. Le QR Code : Le Code-Barres Intelligent

Le QR Code contient des petits carrés remplis de points noirs sont les véritables cerveaux de l'étiquetage moderne. Contrairement au code-barres classique que nous connaissons tous, le QR Code travaille en deux dimensions. Cela signifie qu'il peut stocker une quantité impressionnante d'informations dans un espace très réduit. Là où un code-barres se contente d'un simple numéro, le QR Code peut contenir des adresses web, des manuels d'utilisation complets ou des bases de données entières.

Ce qui fait sa force sur le terrain, notamment dans les environnements difficiles comme les entrepôts ou les usines. Dans la vraie vie, une étiquette finit souvent par être un peu déchirée, couverte de poussière ou tachée par de l'huile. Un code-barres classique deviendrait immédiatement inutilisable. Mais le QR Code est plus robuste : grâce à sa structure intelligente, il reste parfaitement lisible par un smartphone ou une tablette même s'il est partiellement abîmé ou sale. C'est cette fiabilité qui garantit qu'aucune information n'est perdue, peu importe les conditions de travail [21].

Exemple GP1Z : Pour comprendre l'intérêt concret, prenons l'exemple d'un technicien qui intervient sur une pompe ou un bac de stockage via la solution GP1Z. Imaginez la scène : au lieu de retourner au bureau chercher un lourd classeur de procédures ou de fouiller dans un ordinateur pendant dix minutes, il lui suffit de sortir sa tablette.

En un seul scan du QR Code collé sur l'équipement, il voit apparaître instantanément sur son écran la fiche de sécurité complète ou l'historique de toutes les maintenances effectuées sur cette machine. On passe d'une gestion lente et papier à une information immédiate, sûre et disponible directement sur le lieu d'intervention. C'est l'essence même de la logistique moderne: la bonne information, au bon endroit, tout de suite [21].

I.5.3.3. La RFID (Radio Frequency Identification)

La RFID « *Radio Frequency Identification* » est sans doute la technologie la plus puissante pour assurer une traçabilité automatique et sans effort. Contrairement au code-barres qui nécessite d'être vu par un laser, la RFID utilise des ondes radio pour échanger des informations.

Le système repose sur un duo inséparable :

- **L'étiquette (ou Tag) :** On l'appelle aussi transpondeur. Elle est composée d'une minuscule puce électronique et d'une antenne.
- **Le lecteur :** C'est lui qui interroge les étiquettes à distance.

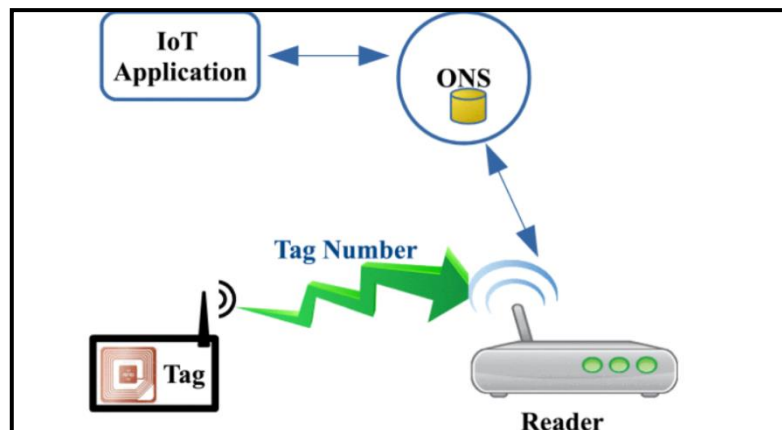


Figure I. 6: RFID system [22]

Le fonctionnement repose sur un dialogue invisible :

1. **L'appel :** Le lecteur envoie un signal radio dans l'air.
2. **Le réveil :** Le lecteur RFID agit comme une station de base. Il envoie des ondes radio dans l'air. Quand ces ondes rencontrent l'antenne de l'étiquette, un phénomène physique se produit : l'étiquette récupère une partie de cette énergie pour s'allumer. C'est un peu comme si la voix du lecteur servait de batterie à l'étiquette.

Selon la distance, on parle de couplage inductif très près, comme un chargeur de téléphone sans fil, ou radiatif plus loin, comme une antenne radio classique.

3. **La réponse** : Une fois que la puce est alimentée par cette énergie, elle répond immédiatement. Pour envoyer les informations stockées dans sa mémoire (comme le numéro unique d'un produit), elle modifie légèrement le signal radio qu'elle renvoie. C'est ce qu'on appelle la modulation.
4. **La traduction** : Le lecteur capte ce signal modifié et le traduit instantanément en langage informatique (en 0 et 1). C'est ainsi que l'ordinateur comprend quel objet vient d'être détecté.

Ce qui est génial, c'est que ça marche dans les deux sens : le lecteur peut aussi envoyer des informations à la puce pour mettre à jour ses données, par exemple pour noter qu'une maintenance a été effectuée [23].

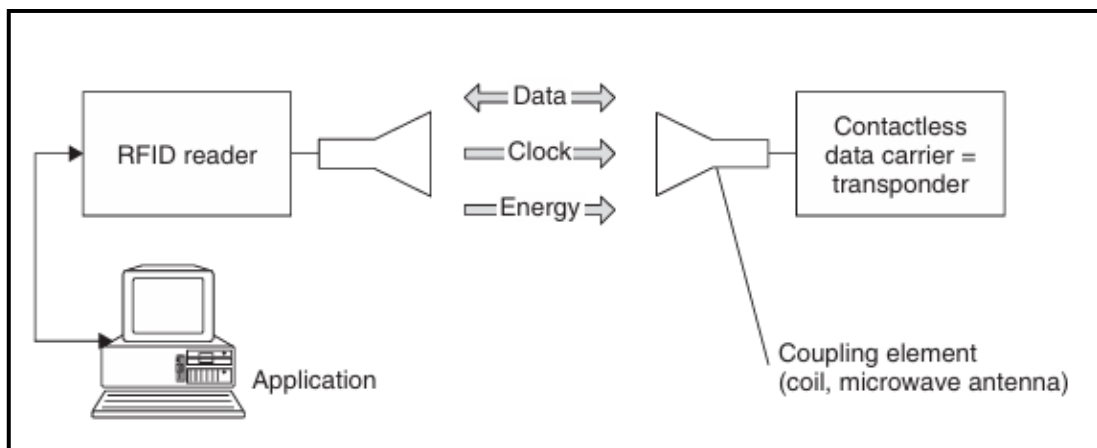


Figure I. 7: Le lecteur et l'étiquette (transpondeur) RFID [23]

Il y'a deux type de RFID :

- **La RFID Passive** : C'est la plus courante. Elle n'a pas de pile. Elle attend que le lecteur l'active. Elle est petite, peu coûteuse, et sa portée va de 1 à 10 mètres. C'est idéal pour scanner des produits sur une palette.
- **La RFID Active** : Elle possède sa propre batterie. Elle émet son signal toute seule, de manière régulière. Elle est plus puissante et peut être détectée jusqu'à 100 mètres. On l'utilise souvent pour suivre des objets de grande valeur ou des véhicules sur de grandes surfaces.[23]

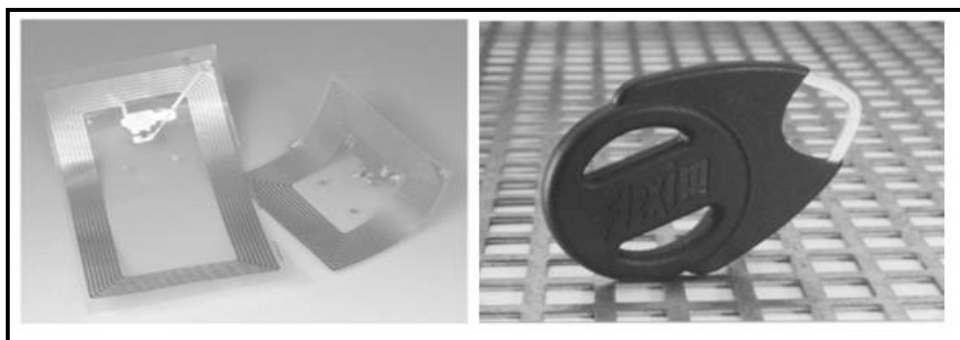


Figure I. 8: RFID passive [23]

Ses avantages sont impressionnants :

- Vitesse record : On peut scanner des centaines d'objets en une seule seconde alors on gagne le temps.
- Pas besoin de vue : Les ondes passent à travers les boîtes, le plastique ou même les murs. Plus besoin de déballer les cartons pour savoir ce qu'il y a dedans.
- Zéro erreur humaine : Tout est automatique. On ne peut pas oublier de scanner un produit, car c'est le système qui le détecte tout seul [23].

Exemple GP1Z : Dans le cadre d'une solution comme GP1Z, la RFID prend tout son sens pour le suivi des actifs lourds. Imaginez un dépôt de bouteilles de gaz ou un parking de camions : chaque bouteille ou chaque véhicule est équipé d'un tag RFID. Lorsqu'ils franchissent l'entrée ou la sortie du dépôt, des portiques les détectent automatiquement. On sait exactement, à la seconde près, qui est entré et qui est sorti, sans que personne n'ait besoin de sortir une tablette pour scanner quoi que ce soit. C'est la fluidité absolue.

I.5.3.4. Le GPS (Global Positioning System)

Le GPS « Global Positioning System » est bien plus qu'une simple carte de navigation ; c'est le pilier de la logistique globale. Là où les technologies de proximité s'arrêtent, le GPS prend le relais pour assurer un suivi géographique précis sur des milliers de kilomètres.[24]

Pour comprendre comment un boîtier posé sur un camion ou un navire sait où il se trouve, il faut lever les yeux vers le ciel. Le récepteur ne se contente pas de recevoir un signal, il réalise un véritable exploit mathématique en temps réel :

- La vitesse de la lumière comme étalon : Le satellite envoie un signal qui voyage à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s). Le boîtier GPS calcule le temps extrêmement court mis par ce signal pour lui parvenir.
- La Trilatération : En connaissant le temps de trajet, le récepteur en déduit sa distance exacte par rapport au satellite.
 - Avec 1 satellite, il sait qu'il est sur une sphère.
 - Avec 3 satellites, il peut déterminer une position à la surface de la terre.
 - Le 4ème satellite est indispensable : il sert à synchroniser l'horloge du boîtier (qui est moins précise que les horloges atomiques des satellites) pour valider l'altitude et éliminer les erreurs de calcul.

Le GPS seul ne suffit plus. C'est son intégration avec l'Internet des Objets (IoT) qui change la donne. Dans le cadre de la logistique 4.0, le boîtier GPS ne se contente plus de calculer une position ; il la transmet instantanément via les réseaux mobiles (4G/5G) ou satellites vers une plateforme centrale [24].

Cette synergie permet d'atteindre la visibilité End-to-End. Ce n'est plus seulement savoir où est le produit, mais pouvoir croiser cette donnée avec d'autres capteurs (température, chocs,

ouverture des portes) pour garantir l'intégrité de la chaîne d'approvisionnement en temps réel. L'avantage majeur du GPS n'est pas seulement de voir le présent, mais de prédire le futur.

Exemple GP1Z : Dans le contexte stratégique du port d'Arzew, cette technologie est vitale. Pour des cargaisons sensibles comme le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) à bord des méthaniers, ou pour les convois de camions de gaz, chaque minute compte. Le système GP1Z permet de savoir exactement quand un navire entrera dans la zone portuaire, permettant ainsi d'optimiser les équipes à quai, de réduire les temps d'attente coûteux et d'améliorer la sécurité globale des opérations.

Tableau I.1 : Résumé comparatif de technologie d'identification

Technologie	Type de flux	Distance de lecture	Besoin de vue directe ?
Code-barres	Information simple	Très courte (cm)	Oui
QR Code	Information riche	Courte (cm/m)	Oui
RFID	Automatique	Moyenne (1 à 100m)	Non
GPS	Localisation mondiale	Illimitée (Extérieur)	Non (Satellite)

I.6. La visibilité

La visibilité logistique se définit comme un accès partagé, précis et surtout immédiat à l'information. Il s'agit de comprendre la dynamique des flux de marchandises et de données en temps réel. C'est la capacité d'avoir une vue globale et instantanée sur l'intégralité de la chaîne à un instant T.

Le véritable pouvoir de la visibilité réside dans la proactivité. En voyant les problèmes au moment précis où ils surgissent, les gestionnaires peuvent les corriger avant qu'ils ne se transforment en crises majeures.

- Si un méthanier est ralenti par une tempête en mer, le port d'Arzew est immédiatement informé et peut réorganiser ses créneaux d'accostage.
- Si un camion tombe en panne, le système détecte l'arrêt prolongé et déclenche une alerte automatique. On passe d'une logistique réactive où l'on constate le problème à l'arrivée à une logistique prédictive [1].

Selon les travaux de B. S. Sahay et al., la visibilité en temps réel est le véritable cerveau de la logistique moderne. Pour ces auteurs, la donnée brute un point GPS, un scan RFID n'a de valeur que si elle est transformée en information décisionnelle.

L'idée centrale de leurs travaux est la suivante : une donnée brute, qu'il s'agisse d'un point GPS sur une carte ou d'un scan RFID en entrepôt, n'a aucune valeur en soi si elle reste isolée. Elle ne devient utile que lorsqu'elle est transformée en information décisionnelle.

En d'autres termes, le système ne doit pas seulement dire où se trouve le produit, mais il doit permettre au gestionnaire de décider quoi faire. Par exemple, au lieu de simplement voir qu'un camion est arrêté, la visibilité intelligente analyse ce retard pour suggérer immédiatement un nouvel itinéraire ou alerter le client final. C'est cette capacité à transformer un signal technique en une action concrète qui fait toute la force de la logistique connectée [25].

La visibilité est l'outil qui réunit toutes les technologies (RFID, QR Code, GPS). Elle est le tableau de bord final qui permet de dire : Je sais exactement ce qui se passe, partout et tout le temps. C'est cette clarté qui permet de réduire les coûts opérationnels et d'assurer une sécurité maximale, particulièrement pour des produits sensibles comme les hydrocarbures.

I.7. Quelle est la différence entre la traçabilité et la visibilité ?

Pour bien piloter une chaîne logistique comme celle de GP1Z, il est indispensable de faire la distinction entre savoir ce qui s'est passé et savoir ce qui se passe. C'est là que se joue la différence entre la traçabilité et la visibilité.

La traçabilité est, par définition, une démarche rétrospective. Elle consiste à enregistrer chaque étape franchie par un produit pour pouvoir, en cas de besoin, reconstituer son parcours. C'est la réponse de la question, d'où vient ce produit et par où est-il passé ?

Elle qui permet, par exemple, de retrouver le lot de fabrication d'une bouteille de gaz défectueuse pour savoir dans quelle usine elle a été remplie et quels composants ont été utilisés. C'est l'outil indispensable pour la conformité légale et la gestion des crises.

La visibilité, elle, s'inscrit dans l'action immédiate. C'est la capacité de voir l'état de la chaîne logistique à l'instant [1].

Elle Répondre à la question Où est mon produit tout de suite et que fait-il ?

C'est elle qui vous permet de voir qu'un méthanier est actuellement à 20 milles nautiques du port d'Arzew ou qu'une palette est en train d'être chargée dans le camion. La visibilité ne se contente pas de l'histoire, elle donne le statut actuel.

On peut dire que la traçabilité est une obligation, tandis que la visibilité est un avantage stratégique.

Selon les experts en gestion de flux, si la traçabilité rassure le client sur la qualité et l'origine, la visibilité, elle, permet de réduire les coûts. Pourquoi ? Parce que si vous voyez un retard en direct (visibilité), vous pouvez réagir tout de suite. Si vous ne faites que de la traçabilité, vous ne découvrirez le retard qu'une fois la marchandise arrivée ou non arrivée, ce qui est souvent trop tard pour agir [26].

Tableau I.2 : Comparaison entre la visibilité et la traçabilité

Caractéristique	Traçabilité	Visibilité
Temporalité	Passé (Historique)	Présent (Temps réel)
Objectif	Preuve, Sécurité, Rappel	Agilité, Réactivité, Optimisation
Question clé	Qu'est-ce qui a été fait ?	Que se passe-t-il maintenant ?

I.8. Problèmes rencontrés dans les systèmes classiques

I.8.1. Manque d'interopérabilité des systèmes

Parmi les principaux problèmes des systèmes logistiques traditionnels est qu'ils ne fonctionnent pas bien ensemble. Les différents outils ce qui fait que les informations restent séparées et difficiles à partager.

Les informations restent souvent enfermées dans des silos, bloquant un échange fluide et structuré. Cette absence de communication complique la coordination entre les différents acteurs de la chaîne et ralentit la gestion des flux logistiques.

De plus, elle limite fortement la visibilité globale et en temps réel des opérations, ce qui affecte immédiatement la performance et la capacité de réaction du système logistique.

Le manque d'interopérabilité constitue un obstacle critique à l'optimisation de la Supply Chain, ce qui explique la nécessité d'adopter des solutions modernes basées sur des systèmes connectés et intelligents [27].



Figure I. 9: Manque d'interopérabilité [28]

I.8.2. Données hétérogènes

Les systèmes logistiques traditionnels sont également confrontés à un problème de données hétérogènes. Les informations proviennent de multiples sources et ne sont pas toujours structurées de manière uniforme.

Cette diversité se traduit par des différences dans les formats, les identifiants et les modes de communication, ce qui rend l'intégration des données complexe.

En conséquence, les entreprises doivent consacrer du temps et des ressources à nettoyer, harmoniser et corriger ces données. Cela ralentit les processus de décision et réduit la visibilité sur tous les acteurs de la chaîne logistique [29].

I.8.3. Retards dans la circulation de l'information

Les systèmes logistiques classiques souffrent aussi de retards dans la disponibilité des informations. Les données ne sont généralement pas accessibles en temps réel, puisqu'elles sont collectées et mises à jour avec un certain décalage.

Ce manque de réactivité entraîne plusieurs conséquences :

- Des décisions basées sur des informations incomplètes.
- Une mauvaise gestion des stocks.
- Des erreurs dans le suivi des commandes.
- Une chute de la qualité de service et de la satisfaction client.

Ces retards s'expliquent souvent par la fragmentation des systèmes, le manque d'intégration entre les acteurs et l'utilisation de technologies dépassées [30].

Chapitre II :

État de l'art des technologies de traçabilité et visibilité

II.1. Introduction

À l'ère de l'Industrie 4.0, la performance logistique ne dépend plus seulement de la force physique du transport, mais de la maîtrise chirurgicale de l'information. Dans ce deuxième chapitre, nous étudions les technologies qui forment aujourd'hui le socle de la visibilité en temps réel.

Cette architecture moderne repose d'abord sur l'Internet des Objets (IoT), qui agit comme les yeux du système sur le terrain pour éliminer l'incertitude liée aux erreurs humaines. Nous verrons comment l'intelligence de ce réseau est répartie de manière stratégique : le Edge et le Fog Computing assurent une réactivité immédiate en cas d'urgence locale, tandis que le Cloud centralise la donnée pour offrir une vision globale de la flotte.

Par la suite, nous analyserons comment l'intelligence artificielle vient donner du sens à ces masses de données, les transformant en prévisions capables d'anticiper les pannes ou d'optimiser les flux. Enfin, nous explorerons le concept de l'internet physique, qui ambitionne d'harmoniser l'ensemble de ces échanges en les standardisant, rendant ainsi le transport de marchandises aussi fluide et écologique qu'un simple envoi d'e-mail.

II.2. L'internet des Objets (IoT) : La couche de perception

II.2.1. Définition et enjeux de la numérisation physique

L'Internet des Objets (IoT) représente la porte d'entrée fondamentale du monde physique vers l'univers numérique. Dans le contexte de la Supply Chain, il englobe un vaste réseau de capteurs et de dispositifs intelligents intégrés directement aux actifs logistiques, tels que les palettes, les conteneurs ou les véhicules. Cette intégration permet de transformer un objet inerte en une entité communicante capable de générer ses propres flux de données de manière autonome. Selon Atzori, Iera & Morabito, l'IoT est comme un paradigme où les objets deviennent des acteurs actifs, capables de s'auto-identifier et de communiquer leur état sans intervention humaine [31].

Contrairement aux schémas logistiques traditionnels où la visibilité dépendait d'actions manuelles scans de codes-barres, saisies de bordereaux, l'IoT dote la chaîne logistique de véritables « organes sensoriels ». Là où l'humain pouvait oublier de signaler un incident, le capteur réagit en temps réel : il peut détecter instantanément une rupture de la chaîne du froid ou un impact brutal subi par une marchandise fragile, émettant une alerte immédiate vers les centres de contrôle.

Selon Dutton, l'IoT élimine le facteur d'erreur humaine dans la collecte de données, permettant une gestion des actifs basée sur des preuves factuelles et immédiates [32].

II.2.2. Architecture technique et composants critiques

Un écosystème IoT ne se limite pas au capteur seul ; sa performance repose sur une symbiose entre trois composants essentiels qui assurent la fiabilité de l'information :

- **Le Capteur (Transducteur) :**

Il agit comme l'interface primaire avec l'environnement. Sa mission est de traduire une grandeur physique réelle (vibration d'un moteur, humidité d'une cale, coordonnées GPS ou température) en un signal électrique quantifiable.

Les capteurs sont les éléments fondamentaux qui permettent de créer une intelligence ubiquitaire dans les environnements urbains et industriels [33].

- **Le Microcontrôleur (Edge Computing) :**

C'est l'unité de traitement locale. Plutôt que d'envoyer des données brutes souvent polluées par des interférences, le microcontrôleur filtre le bruit et effectue un premier traitement. Cette approche, appelée Edge Computing, réduit la consommation de bande passante en ne transmettant que les informations pertinentes.

Le traitement à la périphérie (Edge) est crucial pour les applications nécessitant une faible latence, comme le suivi de véhicules en mouvement [34].

- **Le Module de Communication :**

Il est le pont vers le Cloud. En logistique, la contrainte énergétique est majeure. C'est pourquoi on utilise des protocoles comme MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Ce protocole est privilégié pour sa structure extrêmement légère (Low overhead) et sa capacité à maintenir une communication stable même dans des zones géographiques où la connexion réseau est instable ou limitée [22].

II.3. Le Cloud Computing : La couche d'intelligence centralisée

II.3.1. Définition : Le cerveau de la logistique moderne

Pour bien comprendre, si l'IoT (les capteurs) joue le rôle des nerfs qui ressentent les informations sur le terrain, le Cloud Computing est le cerveau qui reçoit et traite tout. Il ne faut pas voir le Cloud comme un simple disque dur sur internet. C'est en réalité une usine numérique surpuissante capable de transformer des milliers de données brutes en décisions intelligentes. Contrairement aux anciens serveurs installés dans les bureaux, le Cloud offre une puissance de calcul et une souplesse que les entreprises ne pourraient pas gérer seules.

Le Cloud n'est plus une option technique, mais un moteur indispensable qui rend les entreprises de transport beaucoup plus agiles et réactives [35].

Dans ce système intelligent, les informations envoyées par les capteurs (température, vibrations, GPS) ne restent pas bloquées dans l'appareil. Elles voyagent vers ce nuage pour être rassemblées. Cela casse ce qu'on appelle les silos : l'information n'appartient plus à une seule personne, elle est partagée. Cela veut dire qu'un gestionnaire peut surveiller ses camions partout dans le monde depuis une simple tablette, avec des données mises à jour à la seconde près.

Les auteurs Ivanov et al. démontrent que centraliser les informations dans le Cloud est le seul moyen efficace de voir tout ce qui se passe dans une chaîne de livraison et de réagir immédiatement en cas de problème [36].

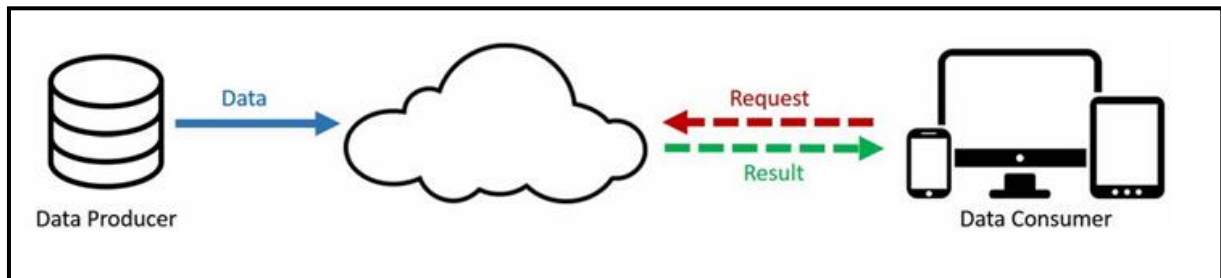


Figure II. 1: Cloud computing [34]

II.3.2. Les trois forces du Cloud pour le transport

Le Cloud change la façon de travailler grâce à trois avantages concrets :

- **L'évolutivité (la souplesse) :**

La logistique change tout le temps (périodes de fêtes, soldes). Le Cloud fonctionne comme un élastique : il s'agrandit pour traiter plus de données quand il y a beaucoup de commandes comme pour le Black Friday et se réduit quand le calme revient. Cela permet de ne payer que ce que l'on utilise vraiment.

Le rapport du NIST définit cette élasticité comme la caractéristique principale du Cloud, permettant aux entreprises de s'adapter sans acheter de nouveaux serveurs physiques [37].

- **L'Accessibilité (le travail d'équipe) :**

Le Cloud permet à tout le monde (le chauffeur, le client et le fournisseur) de voir la même chose au même moment. Cette transparence totale crée un climat de confiance car tout le monde possède la vraie version de l'information, évitant ainsi les erreurs de communication et les appels inutiles. L'utilisation du Cloud aide les différents partenaires d'une chaîne logistique à mieux collaborer et à être plus soudés [38] .

- **Le Big Data et l'IA (l'intelligence prédictive) :**

C'est ici que l'on passe à la logistique du futur. Seul le Cloud possède assez de mémoire pour stocker des millions de trajets et assez de force pour faire tourner des calculs d'intelligence artificielle. Ces outils permettent de deviner l'avenir : ils optimisent les chemins des camions pour consommer moins de carburant ou préviennent si un moteur risque de tomber en panne avant même que cela n'arrive. Wang et al., ces chercheurs confirment que sans la puissance de stockage du Cloud, il serait impossible d'utiliser le Big Data pour améliorer les performances d'une entreprise de transport [39].

II.4. Le Fog Computing : La couche de réactivité (bordure)

II.4.1. Définition

Avec l'explosion de l'Internet of Everything, on se retrouve face à un volume de données massif. Le problème, c'est que tout faire traiter par un cloud centralisé ne fonctionne pas toujours bien, surtout quand la réactivité est une question de sécurité, comme dans le médical ou la gestion d'urgences. Le temps d'envoyer l'info au cloud et de recevoir une réponse, il y a une latence qu'on ne peut tout simplement pas se permettre.

Le Fog Computing constitue une solution efficace. L'idée est assez intuitive : au lieu de tout centraliser, on déporte le cerveau du système à la périphérie du réseau, au plus proche des objets qui génèrent les données. En traitant les informations localement, on règle trois problèmes majeurs d'un coup : on élimine la latence, on évite de saturer le réseau avec des transferts inutiles et on gagne une réactivité immédiate, ce qui est indispensable pour les systèmes distribués d'aujourd'hui [40].

Dans les environnements IoT, les objets connectés génèrent des volumes importants de données (Big Data), qui nécessitent un traitement rapide et performant. Le Fog Computing introduit une couche intermédiaire entre les dispositifs IOT et le cloud, composée de nœuds Fog situés à proximité des utilisateurs. Ces nœuds assurent des fonctions de calcul, de stockage temporaire et de filtrage des données avant leur transmission vers le cloud [41].

Donc, le Fog Computing constitue une solution adaptée aux applications logistiques intelligentes, particulièrement pour la traçabilité et la visibilité en temps réel des objets sensibles. Grâce à l'intégration de capteurs et de systèmes de géolocalisation, il devient possible de détecter rapidement les anomalies et de générer des alertes en temps réel, garantissant ainsi la sécurité et la fiabilité des opérations logistiques [41].

II.4.2. L'architecture du Fog Computing :

L'architecture du Fog Computing se structure de manière hiérarchisée, permettant une gestion intelligente du flux d'informations :

Couche de Perception : C'est le point de collecte. Elle regroupe l'ensemble des capteurs intégrés aux objets logistiques qui captent les données physiques en temps réel.

Couche Fog : Cette couche joue le rôle de cerveau local. Elle reçoit les données brutes des capteurs pour effectuer :

Le filtrage : Éliminer les données redondantes ou inutiles.

Le prétraitement : Normaliser les données et détecter les seuils critiques.

Le stockage temporaire : Conserver les données locales nécessaires à la prise de décision immédiate.

Couche Cloud : Les nœuds Fog transmettent vers le Cloud les données agrégées qui nécessitent une puissance de calcul supérieure. C'est ici qu'interviennent :

L'archivage historique à long terme.

Les analyses prédictives complexes.

La gestion globale de la flotte et des inventaires [42].

II.5. Le Edge Computing : L'intelligence à la source

Si le Cloud peut être comparé au cerveau central, le Edge Computing ou traitement à la périphérie, représente les terminaisons nerveuses du système. C'est ici que l'intelligence se rapproche le plus possible du terrain [43].

II.5.1. Un fonctionnement local et rapide

Le principe du Edge Computing est simple : au lieu d'envoyer systématiquement chaque petite donnée (souvent inutile ou répétitive) vers des serveurs lointains dans le Cloud, le traitement se fait directement au bord du réseau. Cela signifie que le microcontrôleur de votre camion, ou une passerelle située juste à côté, analyse l'information instantanément. On ne transmet au Cloud que les résultats essentiels ou les alertes importantes. Cela permet de ne pas encombrer la connexion internet (comme le réseau Djazzy) avec une masse de données brutes sans intérêt[42].

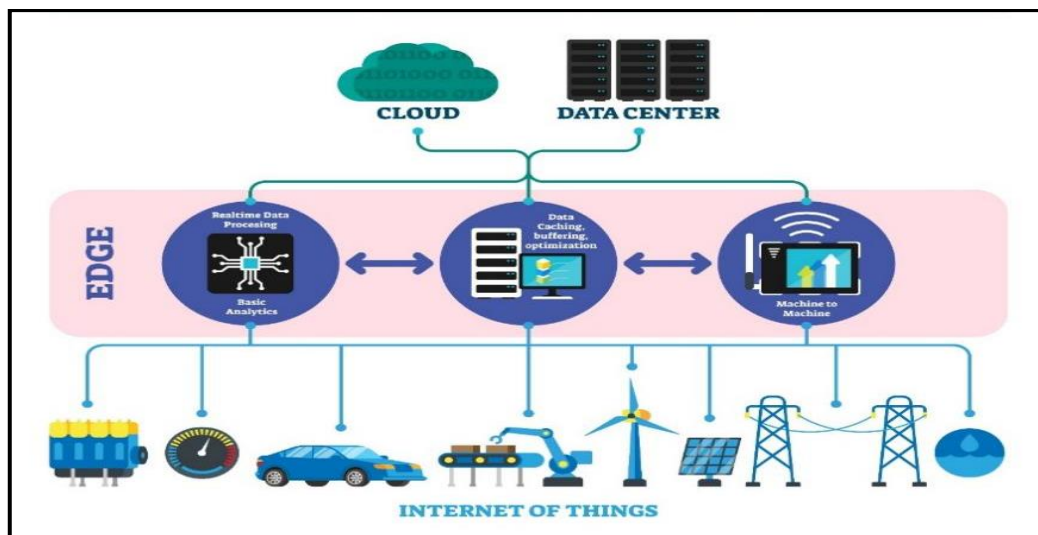


Figure II. 2: Edge Computing (Traitement à la source) [40]

II.5.2. Un atout majeur pour la réactivité et la sécurité

L'apport du Edge Computing est indispensable, particulièrement pour la sécurité des opérations logistiques :

Une action immédiate (Faible latence) : Dans des situations critiques, chaque microseconde compte. Si un capteur détecte une anomalie grave (comme une surchauffe motrice ou un choc violent), le système Edge peut prendre la décision d'arrêter la machine ou d'alerter le chauffeur immédiatement, sans attendre que l'information fasse l'aller-retour jusqu'au serveur Cloud [41].

Protection des données sensibles : En traitant les informations localement, on limite la circulation de données confidentielles sur Internet. Cela réduit considérablement les points

Chapitre II : Etat de l'art des technologies de traçabilité et visibilité

d'entrée pour d'éventuels piratages, puisque les données ne sortent du système local que lorsqu'elles sont strictement nécessaires [42].

Selon Amir Vahid Dastjerdi et Rajkumar Buyya, le Edge Computing se définit comme le niveau de calcul offrant la latence la plus faible possible. C'est cette vitesse de réaction qui permet de transformer une simple observation (visibilité) en une intervention concrète et immédiate sur le terrain [43].

Tableau II.1 : Comparaison : Edge vs Fog vs Cloud

Caractéristique	Edge Computing	Fog Computing	Cloud Computing
Emplacement	Directement sur l'objet (Capteur, Caméra)	Réseau local du site (Passerelle, Serveur local)	Centres de données distants (Internet)
Temps de réponse	Temps réel pur (< 1 ms)	Temps réel rapide (< 10ms)	Temps différé (> 100ms)
Capacité de calcul	Très faible (Calcul simple)	Moyenne (Analyse locale)	Massive (Big Data / IA lourde)
Objectif	Réaction immédiate et filtrage	Coordination locale du site.	Archive, stratégie et analyse globale

Le déploiement à grande échelle de capteurs connectés entraîne la génération d'un volume considérable de données. Dans ce contexte, les architectures Cloud traditionnelles montrent leurs limites, notamment en raison de la saturation de la bande passante et de la latence du réseau, ce qui rend le traitement des données moins fluide. Afin de remédier à ces contraintes, le Edge Computing propose de rapprocher les capacités de calcul de la périphérie du réseau, au plus près des sources de données.

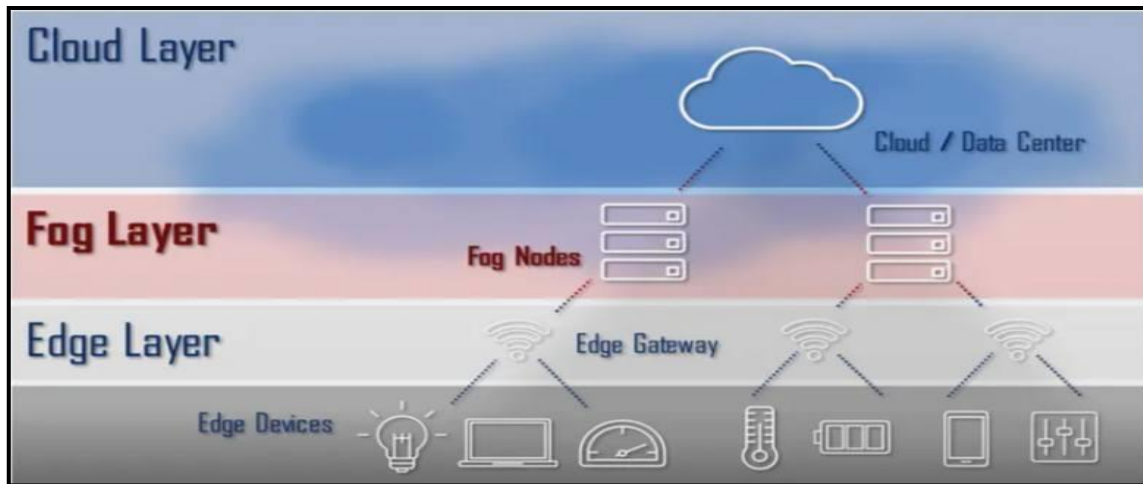


Figure II. 3: Schémas des trois couches dans l'architecture d'une application Cloud[44]

II.6. L'intelligence artificielle (IA) : La couche cognitive

II.6.1. Définition de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle s'impose aujourd'hui une place importante dans transformation digitale logistique. Elle permet d'évoluer d'un modèle traditionnel, essentiellement réactif, vers une logistique intelligente, capable d'anticiper, d'analyser et d'optimiser les opérations en temps réel [36].

II.6.2. Rôle de l'IA dans la logistique moderne

L'IA est utilisée dans plusieurs domaines de la logistique :

- Optimisation des trajets (le calcul intelligent des itinéraires permet de réduire les coûts et le temps de transport)
- Précision de la demande (Grace à l'analyse prédictive, les entreprises peuvent anticiper les besoins en stockage et distribution.
- Suivi intelligent des actifs (le monitoring en temps réel permet de détecter les comportements anormaux).
- Maintenance prédictive (l'IA identifie les risques de défaillance et prévenir les pannes avant qu'elles ne surviennent).

Selon Ivanov et al. , l'IA permet de rendre les chaînes logistiques plus résilientes et adaptatives face aux perturbations [36].

II.6.3. IA et traçabilité en temps réel

Dans les systèmes de traçabilité, l'IA est utilisée pour analyser les données provenant des capteurs

Elle permet notamment de :

- Détecter des mouvements inhabituels des équipements ou des trajectoires suspecte.
- Identifier les conditions anormales qu'il s'agisse de chocs répétés durant le transport ou de variation thermique critique.
- Générer des alarmes automatiques pour permettre aux équipes opérationnelles d'intervenir immédiatement sans attendre une analyse manuelle.

Comme le souligne Waller & Fawcett, l'analyse avancée des données logistiques permet de transformer les données brutes en informations utiles pour la prise de décision [45].

II.6.4. Les limites actuelles

L'application de l'IA dans la logistique industrielle peut rencontrer certaines limites :

- Besoin de grandes quantités de données (IA doit analyser un très grand volume d'informations pour comprendre et fonctionner correctement).
- Complexité des modèles apprentissage (les systèmes sont parfois difficiles à installer, à comprendre et à gérer au quotidien.
- Dépendance à la qualité des capteurs (si les capteurs sont de mauvaise qualité ou tombe en panne, l'IA ne peut plus faire son travail).
- Coût d'implémentation (installer ces technologies coûte chère au départ, ce qui peut freiner certaines entreprises) [46].

II.7. L'internet physique : La couche de standardisation

II.7.1. Définition

L'internet physique, c'est une vision assez captivante qui consiste à appliquer la logique du web au monde réel de la logistique. Pour faire simple, imagine que le transport de marchandises fonctionne exactement comme le transfert de données sur Internet de manière fluide, ouverte et ultra-efficace.

Chaque entreprise a tendance à gérer sa propre logistique, souvent en vase clos. L'internet physique veut casser ces silos. L'idée est de créer un réseau mondial standardisé où les produits ne sont plus isolés, mais encapsulés dans des unités logistiques intelligentes. Ces unités circulent alors sur un réseau interconnecté, passant d'un transporteur à un autre de façon améliorée, justement comme un e-mail.

Comme le souligne Benoît Montreuil, qui est l'un des pionniers de ce concept, l'objectif est de transformer totalement la logistique mondiale. On cherche à passer d'un système fermé à un modèle ouvert, interopérable et notamment beaucoup plus durable, où les ressources sont partagées entre tous les acteurs pour gagner en efficacité [47].

II.7.2. Principe de fonctionnement

L'internet physique remet sur plusieurs principes essentiels :

- Standardisation :

Les produits sont emballés dans des unités standard appelées π -containers, facilitant leur manipulation et transport.

- Interconnexion des réseaux logistiques :

Les réseaux logistiques sont connectés entre eux, permettant une circulation fluide des marchandises, comme les paquets de données sur Internet.

- Mutualisation des ressources :

Les capacités de transport et de stockage sont partagées entre plusieurs acteurs afin de réduire les coûts et optimiser l'utilisation des ressources.

- Traçabilité et intelligence :

Chaque unité logistique est suivie en temps réel grâce aux technologies IoT, GPS et systèmes intelligents [48].

II.7.3. Importance de l'internet physique

L'internet physique est considéré comme une révolution dans le domaine de la logistique car il permet :

- Une réduction des coûts de transport :

En mutualisant les transports, on finit par remplir les camions et conteneurs au maximum, ce qui élimine les trajets coûteux avec des véhicules à moitié vides. Cette optimisation du remplissage réduit mécaniquement le coût unitaire pour chaque colis transporté. Au final, les entreprises réalisent des économies d'échelle significatives grâce au partage intelligent des moyens logistiques[49].

- Une diminution de l'effet environnemental :

Moins de camions sur les routes pour transporter le même volume de marchandises signifie automatiquement moins d'émissions de CO₂ et moins de pollution atmosphérique. L'internet physique favorise une logistique plus verte en rationalisant les trajets et en limitant la congestion urbaine. C'est un levier très concret pour réduire l'empreinte carbone globale de tout le secteur du transport [49].

- Une meilleure utilisation des ressources logistiques :

Au lieu de multiplier les entrepôts privés souvent sous-utilisés, le système favorise l'accès partagé à des infrastructures performantes. Cela permet d'améliorer l'occupation des espaces de stockages et de tri en fonction des besoins réels du moment. On gagne ainsi en efficacité en utilisant au mieux les capacités existantes, sans avoir à en construire de nouvelles inutilement[49].

- Une traçabilité complète des marchandises :

Chaque produit est encapsulé dans une unité intelligente, ce qui permet de la suivre avec précision à chaque étape de son parcours. Grâce aux technologies connectées, on obtient une

visibilité totale sur l'emplacement, l'état et l'intégrité du produit. On sait exactement où se trouve l'objet en permanence.

- Une optimisation des flux en temps réel :

Le système est capable de s'adapter instantanément aux imprévus, comme un embouteillage ou un retard sur une ligne. Les flux sont redirigés dynamiquement via les routes les plus efficaces pour assurer la livraison dans les meilleurs délais. Cette réactivité transforme la logistique rigide en un réseau fluide, intelligent et capable de se corriger tout seul [49].

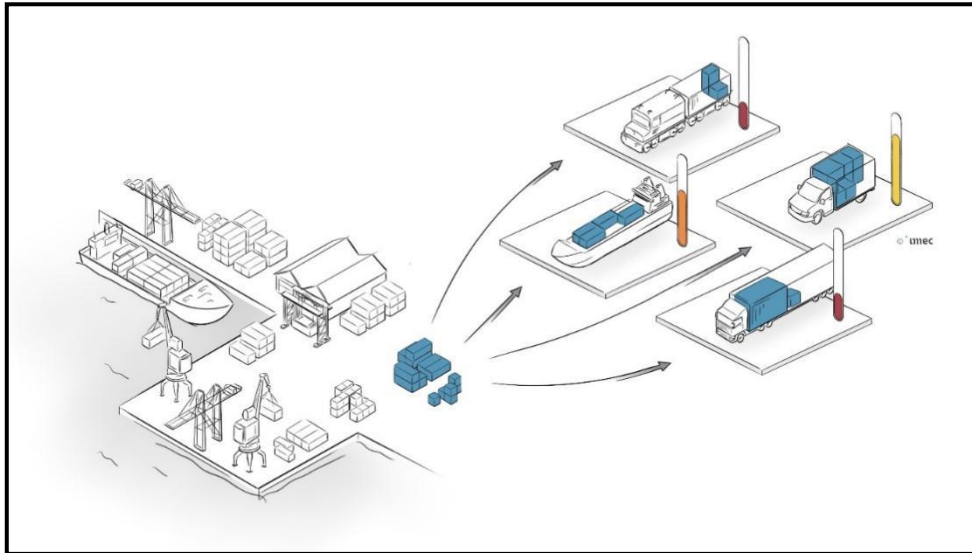


Figure II. 4: La fragmentation des livraisons et des faibles taux de chargement.[49]

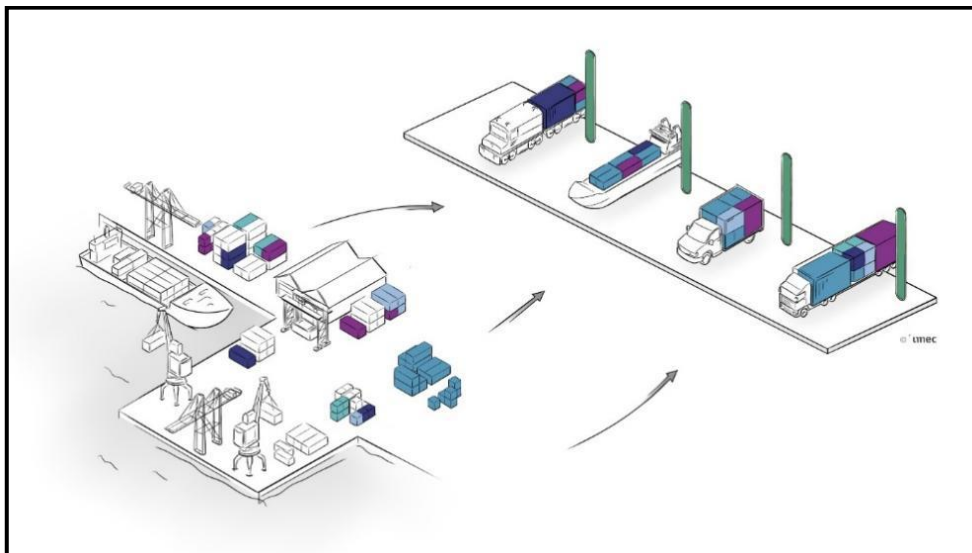


Figure II. 5: Contribution de l'Internet Physique à la maximisation du taux de remplissage des différents modes de transport.[49]

Chapitre III :
Conception de système
proposé

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous entrons au cœur de notre projet en détaillant la phase de conception du système de suivi. Notre démarche ne se limite pas à l'aspect technique ; elle commence par une analyse précise du besoin réel. Pour ce faire, nous définissons d'abord le cas d'étude spécifique à notre projet, ce qui nous permet d'établir un cahier des charges rigoureux. Ces exigences servent de fondations solides pour construire l'architecture globale du système, une structure multicouche pensée pour garantir une transmission de données fiable et sécurisée entre le terrain et l'utilisateur final.

III.2. Présentation du cas d'étude

Dans ce chapitre, nous présentons la conception du système proposé. Nous commençons par décrire le cas d'étude alors que le cahier des charges, puis nous détaillons l'architecture globale du système.

Au début, notre projet visait à développer un système de traçabilité pour les camions de transport de gaz. Toutefois, lors de notre stage au sein de Sonatrach (complexe GP1Z), nous a permis de constater que l'entreprise ne possède pas de camions dédiés au transport.

En effet, Sonatrach assure uniquement la production et le traitement du gaz, alors que sa distribution est confiée à des entités externes comme Naftal, des camions privés ou des navires.

Malgré cette contrainte, nous avons étudié de manière théorique et virtuelle le cas de traçabilité des camions afin de bien comprendre les besoins et les mécanismes associés à ce type de système.

Pour répondre à ce besoin, notre solution propose la mise en place d'un système intelligent permettant de suivre en temps réel les camions citernes tiers qui transportent du gaz. Ce système repose sur l'intégration d'un module GPS qui assure simultanément la précision des camions. Ce module GPS est intégré dans une carte de développement de type ESP32 TTGO LTE GPS SIM7600, qui assure le suivi géographique et la transmission continue des données de transport.

Pour garantir la transmission des informations en temps réel, la carte est équipée d'une carte SIM de l'opérateur Djezzy, exploitant le réseau mobile 4G. Cette connectivité permet d'assurer une liaison stable et permanente entre les camions et la plateforme de supervision centralisée.

En parallèle, le système intègre une gamme de capteurs dédiés à la sécurisation complète de camion et de sa cargaison. Un capteur de température étanche de type DS18B20 assure un suivi thermique rigoureux du gaz, et vérifier qu'elle reste dans les normes de sécurité. En complément, un capteur de mouvement de type SW-420 permet de surveiller l'intégrité dynamique du camion en détectant en temps réel les vibrations anormaux, les chocs ou encore les accidents éventuels du camion.

Ces divers composants est interconnecté à l'aide d'une breadboard, formant une unité embarquée capable de collecter et transmettre différentes données critiques.

Par ailleurs, nous avons initialement prévu d'intégrer un capteur de pression, un capteur de débit ainsi qu'un capteur de détection de fuite de gaz afin de renforcer la sécurité du système.

Toutefois, nous n'avons pas pu concrétiser cette partie, car ces capteurs n'étaient pas disponibles au moment de réalisation du projet, et nous n'avons pas réussi à les trouver sur le marché local.

Par conséquent, ils n'ont pas été intégrés dans la version finale du prototype, mais ils restent une perspective d'amélioration future du système.

En complément de la géolocalisation des camions, nous avons également proposé une solution stratégique adaptée aux réalités du site industriel, basée sur la traçabilité des équipements à forte valeur. Cette solution repose sur l'intégration de module GPS autonomes dans des boîtiers durcis et étanches, conçus spécifiquement pour protéger les composants électroniques contre les conditions environnementales telles que la chaleur, l'humidité et des chocs.

Ce boîtier intègre une alimentation par batterie, permettant un fonctionnement autonome du système sans dépendre d'une source d'énergie externe. L'utilisation d'un boîtier étanche est particulièrement recommandée lorsque les équipements soumis à des contraintes environnementales difficiles.

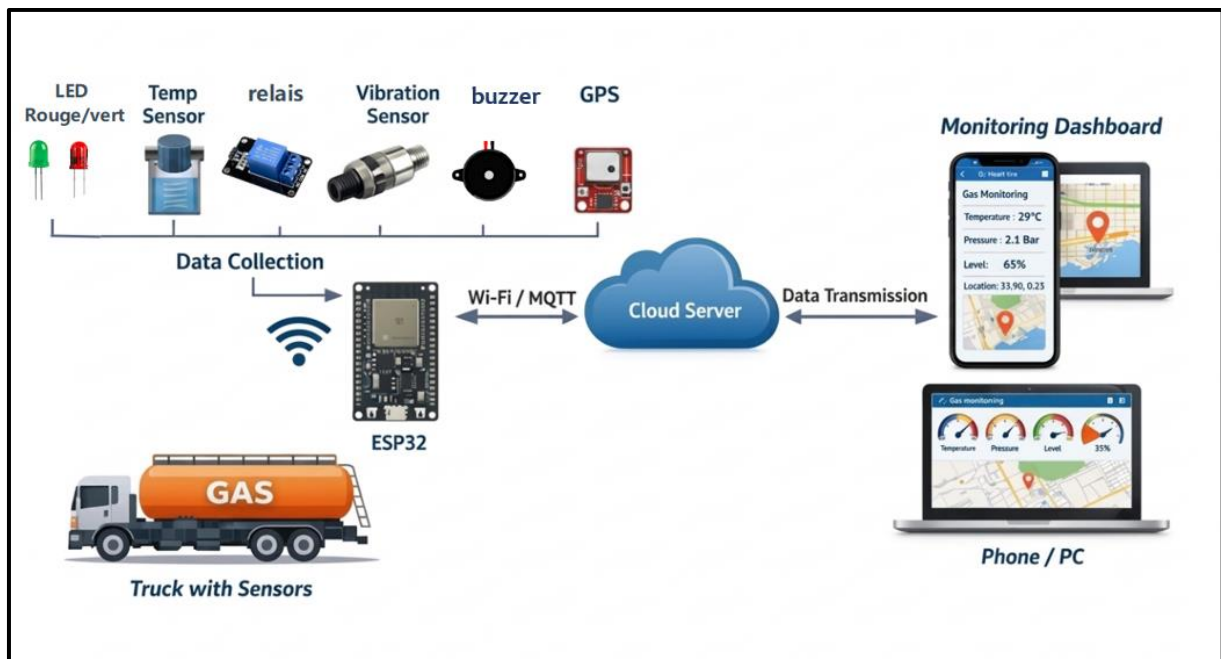


Figure III. 1: schémas globale simplifié de notre système.

III.3. Architecture globale du système

Cette illustration présente l'architecture détaillée d'un système de traçabilité et de visibilité déployé au sein du complexe gazier GP1Z de Sonatrach.

Le système couvre toutes les étapes de la chaîne de traitement du gaz naturel, depuis les champs gaziers du désert jusqu'à la L'expédition finale, couvrant ainsi les besoins du marché national et des exportations internationales.

Le système repose sur un maillage de capteurs installés sur les infrastructures clés (pipelines, compression, traitement) et les camions GNL afin de mesurer plusieurs paramètres industriels comme la température, la pression, le niveau , le débit ainsi que la détection de fuite de gaz. Le traitement des informations collectées repose sur une carte ESP32 associée à un module SIM7600 et un système GPS pour assurer la communication et la localisation en temps réel. Le système intègre également un buzzer utilisé comme dispositif d'alarme sonore pour signaler immédiatement une anomalie ou une fuite de gaz.

Un relais est aussi utilisé afin de commander automatiquement certains équipements électriques comme l'ouverture ou l'arrêt d'un circuit selon les informations reçues par le système. Les résistances sécurisent l'électronique en limitant le courant, et le LED font office de voyants lumineux pour surveiller l'état du système.

L'acheminement des données repose sur les protocoles Modbus MQTT « Message Queuing Telemetry Transport » et TCP « Transmission Control Protocol » vers une infrastructure Cloud (adafruit IO). Ce flux permet de centraliser, d'analyser et de convertir les informations en tableaux de bord interactifs pour un suivi en temps réel.

Grace à cette architecture, le complexe bénéficie d'un contrôle continu de ses procédés, d'une sécurité accrue et d'une traçabilité rigoureuse de la chaîne d'exportation du gaz naturel liquéfié.

Note : Le MQTT est un protocole de messagerie réactif et optimisé pour que les objets connectés communiquent sans encombrer le réseau.

Le Modbus TCP est un protocole industriel historique au réseau Ethernet, facilitant le dialogue direct et rapide entre tous les équipements d'une ligne de production.

ARCHITECTURE DÉTAILLÉE DU SYSTÈME DE TRAÇABILITÉ & VISIBILITÉ – SONATRACH GP1Z

Gaz du Désert → Traitement GP1Z → Liquéfaction → Distribution Nationale & Export

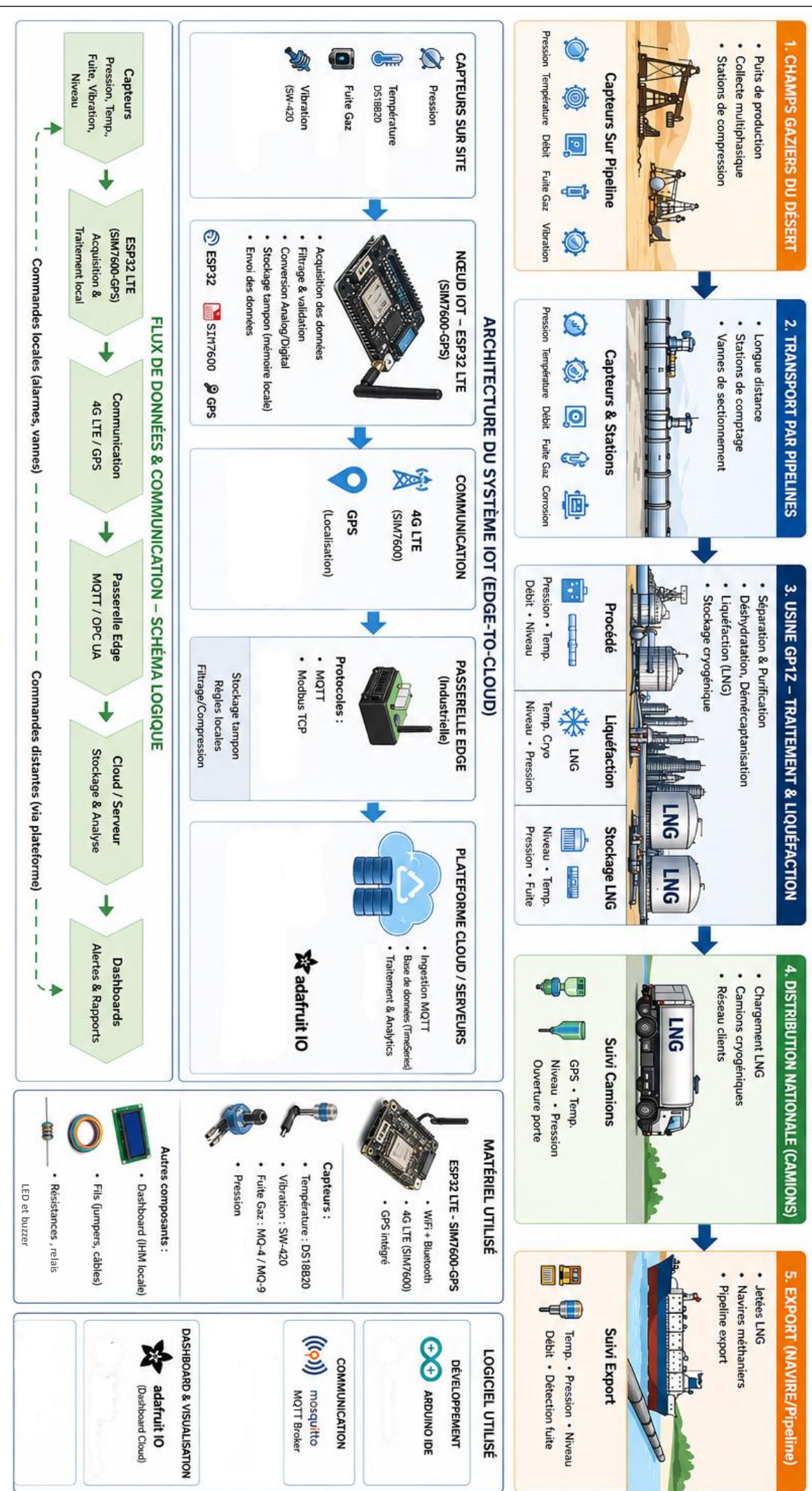


Figure III. 2: Architecture globale d'un système de traçabilité et de visibilité

III.4. Conception matérielle

III.4.1. Contexte général

Dans le cadre de notre réalisation d'un système de traçabilité, le choix des composants matériels est déterminant pour garantir l'efficacité et la performance de notre prototype.

Notre architecture s'articule autour d'une unité centrale, associée à des capteurs permettant de collecter des données critiques liées à l'état du camion et de sa cargaison. La conception modulaire retenue assure une interconnexion simplifiée et une intégration optimale de l'ensemble des composants.

Dans cette section, nous faisons le tour du matériel que nous avons choisi. Tout s'articule autour de la carte ESP32 TTGO (SIM7600), véritable cerveau du projet, à laquelle nous avons greffé un capteur de vibrations SW-420 et une sonde de température DS18B20. Nous allons voir ensemble ce que chaque composant apporte concrètement et comment ils interagissent pour faire tourner le dispositif.

La carte ESP32 TTGO LTE GPS SIM7600, qui fait office de cerveau électronique. il s'agit d'une carte de développement intégrant un microcontrôleur ESP32, un module de communication 4G (SIM 7600) et le suivi de localisation précis via son module GPS intégré.

III.4.2. ESP32 TTGO LTE GPS SIM7600

Au cœur du système, le microcontrôleur ESP32 prend en charge le traitement des flux de données capteurs, tandis que le module GPS fournit une géolocalisation précise du camion. Par ailleurs, le module SIM7600 garantit la transmission des Informations via le réseau mobile, rendant ainsi possible le suivi opérationnel en temps réel.

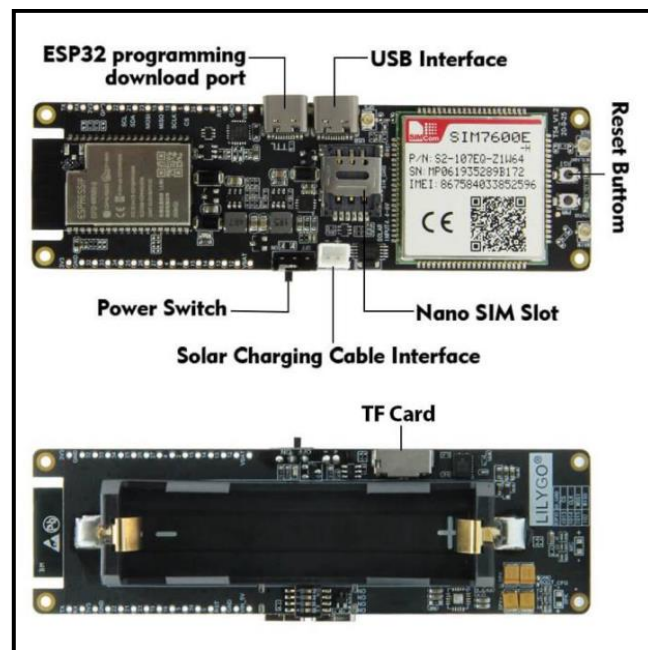


Figure III. 3: ESP 32 SIM7600 [50]

Grâce à son intégration multifonctionnelle, cette carte permet de simplifier considérablement la conception du système et réduit le nombre de composants externes.

Cette carte occupe une place centrale dans l'architecture de notre système. Elle assure en effet trois missions essentielles :

- Acquisition des données des capteurs.
- Récupération des coordonnées GPS.
- Transmission des données vers une plate-forme distante via le réseau 4G.

Son usage permet de regrouper L'ensemble des fonctions des systèmes au sein d'un unique module embarqué.

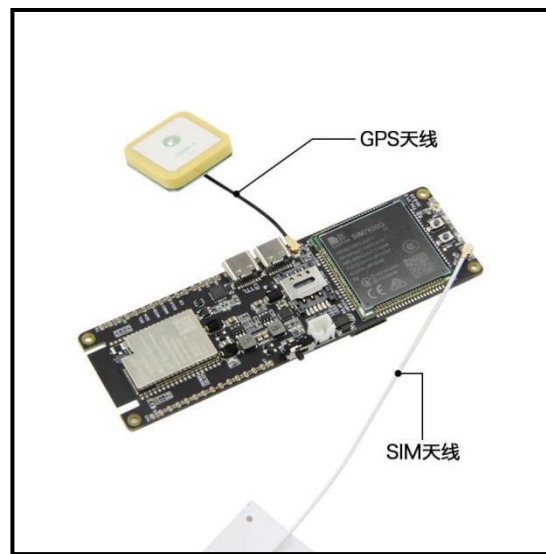


Figure III. 4: GPS et l'antenne [50]

III.4.2.1. Les éléments importants de la carte LILYGO T-SIM7600 ESP32

Les broches GPIO :

Les GPIO des broches d'entrée/sortie à usage général, constituent les connexions principales de l'ESP32. Elles servent de pont pour relier la carte à tout votre écosystème électronique : capteurs, LED, relais, buzzers ou autres modules. En plus de ces fonctions de base, plusieurs de ces broches sont également capables de gérer des protocoles de communication plus avancés comme l'UART, le SPI ou l'I2C.

Antenne LTE :

L'antenne LTE permet au module SIM7600 de communiquer avec le réseau mobile 4G. Elle assure l'envoi et la réception des données Internet, appels ou SMS.

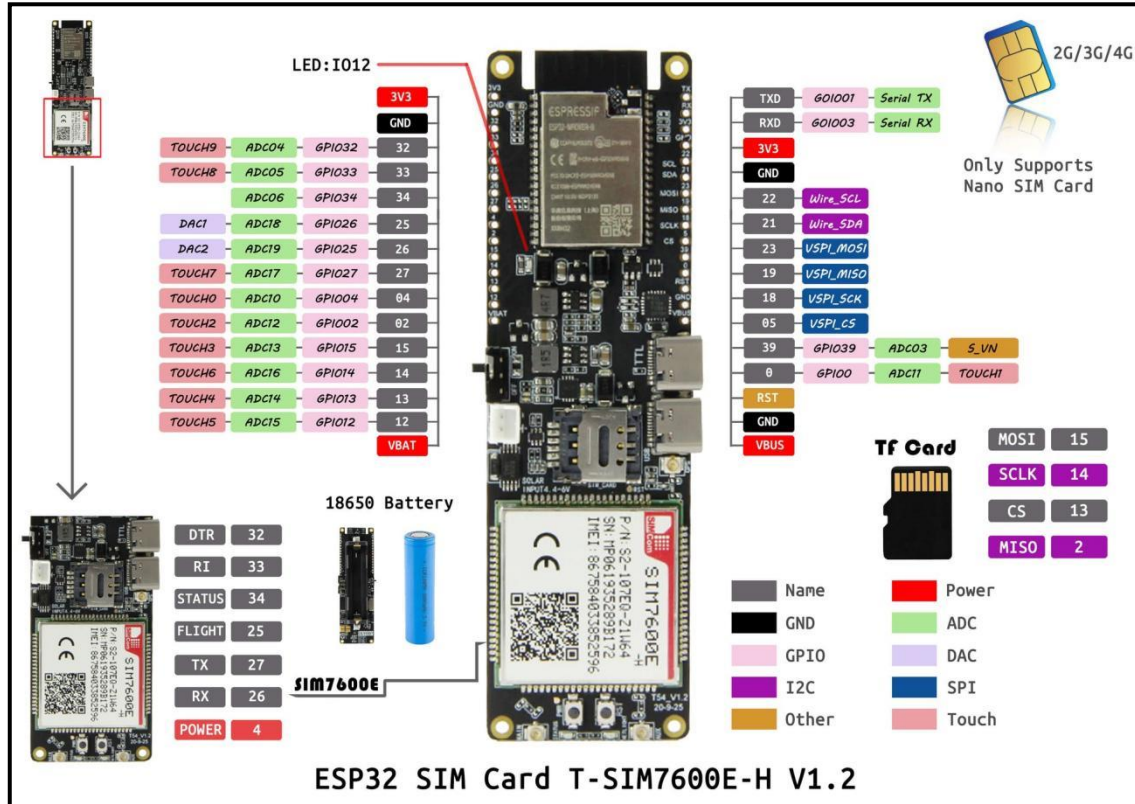
GPS :

Le GPS intégré permet de récupérer la position géographique du système en temps réel grâce aux satellites.

L'interface USB :

Le port USB remplit trois fonctions indispensables au quotidien :

- Transférer le programme.
- D'alimenter la carte.
- Établir la communication série avec l'ordinateur.



TF Card (MicroSD) :

Le port TF Card permet d'insérer une carte mémoire microSD pour stocker les données du projet (mesures, logs, alertes).

III.4.3. Capteur de vibration SW-420

Le SW-420 est un module de détection de vibration à haute sensibilité basé sur un commutateur à ressort non directionnel .il fonctionne sur un principe mécanique simple : lorsqu'une vibration ou un impact est détecté, le capteur génère un signal électrique.

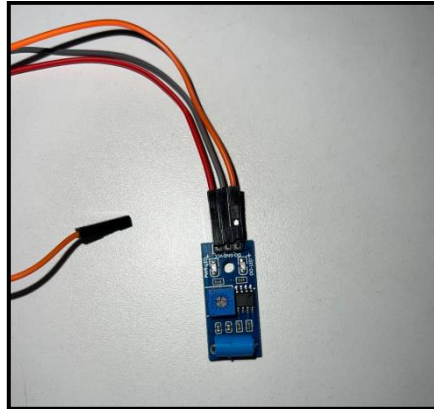


Figure III. 6 : capteur de vibration SW-420

Le capteur de vibration SW-420 Vibration Sensor module fonctionne grâce à un mécanisme mécanique interne composé d'un ressort et d'un contact métallique.

-Au repos (sans vibration) :

Le ressort reste bien droit et stable. Le circuit électrique est dans son état initial, sans aucune perturbation.

- Lorsqu'une vibration ou un choc apparaît :

Au moindre choc ou vibration, le ressort se met à osciller. Ce mouvement provoque une série d'ouvertures et de fermetures ultra-rapides du contact interne.

Cette variation mécanique est transformée en signal électrique.

C'est là qu'intervient le comparateur LM393 :

il analyse ce signal pour le transformer en une valeur numérique claire (1 ou 0) [51].

Intégré au châssis du camion, il assure une surveillance constante de l'état vibratoire. Il est particulièrement efficace pour identifier :

-Les vibrations importantes.

-Les secousses anormales pouvant compromettre le chargement.

-Les chocs brutaux liés à des collisions ou à des collisions ou à une conduite brusque. [52]

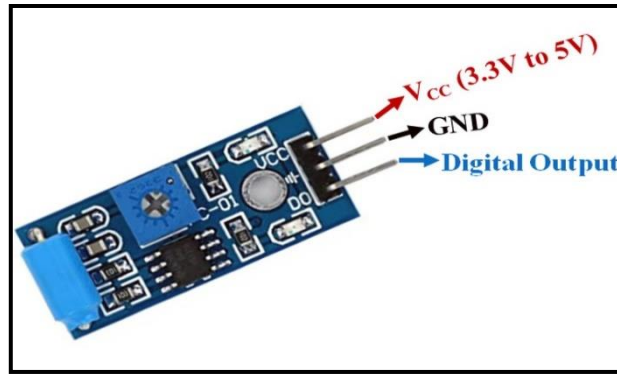


Figure III. 7 : SW-420 Vibration Sensor Module Pin out [51]

Ce capteur analyse les signaux reçus et les transmet en cas d'anomalie, constituant ainsi une brique essentielle de la sécurité active du système.

III.4.4. Capteur de température DS18B20 étanche

Le DS18B20 est une sonde thermique numérique de haute précision, utilisée dans les secteurs industriels grâce à sa version étanche. Il permet de mesurer avec précision la température sur une large plage de fonctionnement.

Ce capteur est employé pour monitorer la température du gaz durant le transport. Il est essentiel pour garantir que les conditions de transport restent dans les normes de sécurité.

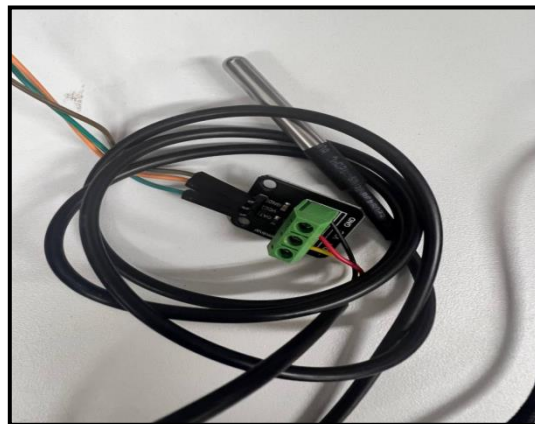


Figure III. 8: capteur de température

Le capteur de température DS18B20 fonctionne en détectant la température du milieu à l'aide d'un petit composant sensible thermique intégré.

- Conversion numérique :

Son implémentation au sein du dispositif offre les avantages suivants :

- La prévention des risques liés à la surchauffe
- Un monitoring thermique continu et instantané.
- La détection de variations anormales.

III.4.5. Buzzer

Un buzzer est un petit composant électronique qui transforme un signal électrique en son (bip). Il est utilisé pour signaler une alerte, une erreur ou une détection dans un système électronique.



Figure III. 9: buzzer [53]

On distingue généralement deux modèles :

-Buzzer Passif :

Il fonctionne comme un petit haut-parleur et nécessite un signal PWM pour varier les fréquences et créer différentes notes.

-Buzzer actif :

C'est le plus simple. Il génère un son constant dès qu'il est sous tension.

Pour un montage avec un ESP32, le buzzer actif est souvent privilégié pour créer des alertes sonores ou des alarmes de sécurité sans complexifier le code [54].

Il permet de :

-Surveiller en temps réel du système.

-Donner une alerte sonore rapide en cas de vibration.

III.4.6. Relais

Le relais électromécanique (Electromechanical Relay) est un composant électromécanique utilisé pour commander un circuit électrique à l'aide d'un faible signal provenant du microcontrôleur (ESP32).

Il agit comme un interrupteur automatique permettant d'allumer ou d'éteindre un appareil électrique [55].

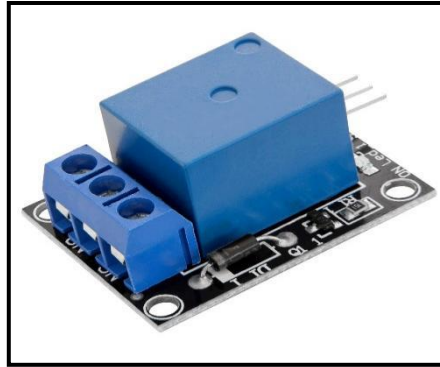


Figure III. 10 : relais [55]

Le relais agit comme un interrupteur électronique piloté par l'ESP32. Son rôle est de faire le pont entre la basse tension du microcontrôleur et la puissance de l'équipement à commander.

-Si l'ESP32 envoie un signal HIGH (1) :

Le courant traverse la bobine interne du relais.

Cela génère un champ magnétique qui attire mécaniquement le contacteur.

Le circuit de puissance se ferme, ce qui met l'appareil sous tension.

-Si le signal passe à LOW (0) :

La bobine n'est plus alimentée et le champ magnétique disparaît.

Le contact reprend sa position de repos grâce à un ressort.

Le circuit est coupé et l'appareil s'arrête.

Ce composant permet à l'ESP32 de contrôler en toute sécurité des appareils qui consomment beaucoup d'énergie.

III.4.7. Les éléments secondaires

III.4.7.1. Résistance

Une résistance est un composant électronique qui sert à limiter le passage du courant électrique dans un circuit. Elle protège les composants sensibles comme LED et les capteurs DS18B20 contre les courants trop élevés.

Elle est indispensable pour configurer des circuits en pull-up ou pull-down, garantissant ainsi une lecture propre et stable des données, sans interférences électromagnétiques.



Figure III. 11 : résistance de 4.7 k Ohm

III.4.7.2. LED

Une LED « Light Emitting Diode » est une diode électroluminescente qui produit de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant électrique dans le bon sens. Elle est utilisée comme indicateur visuel dans les circuits électroniques.



Figure III. 12 : LED [56]

Note : LED vert joue le rôle d'une pompe d'essence.

III.4.7.3. Breadboard et jumpers

Une breadboard est une plaque de prototypage utilisée pour réaliser et tester des circuits électroniques sans soudure. Elle permet de connecter facilement les composants électroniques et les jumpers.

Les jumpers sont des fils de connexion utilisés pour relier les différents composants électroniques d'un circuit entre eux.

Ils permettent d'assurer la transmission de l'alimentation et des signaux électriques entre l'ESP32, les capteurs et les autres modules.

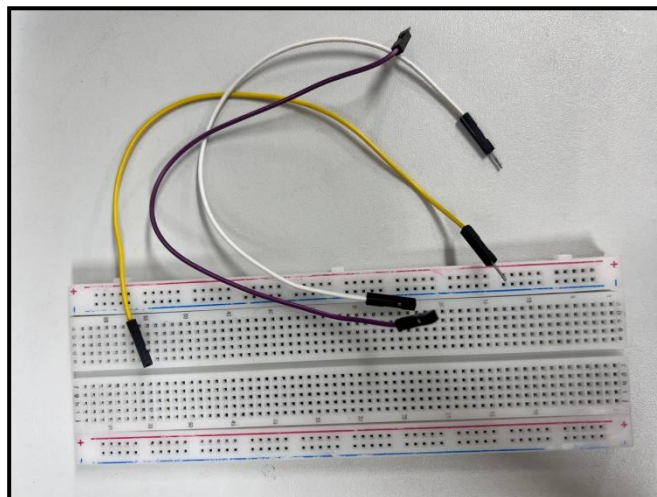


Figure III. 13 : Fils femelle male et Breadboard

III.4.8. Boîtier étanche

Un boîtier étanche est un boîtier de protection conçu pour protéger les composants électroniques contre les éléments extérieurs. Grâce à ça, le matériel peut fonctionner sans problème, peu importe l'endroit où les conditions météo.

Ce boîtier est totalement hermétique, il se ferme de façon super étanche pour faire barrière à l'eau et à la poussière.

Tous les composants électroniques restent bien à l'abri à l'intérieur, complètement isolés du monde extérieur.

L'utilisation d'un boîtier étanche présente plusieurs avantages :

- Réduction des risques de panne ou court-circuit.
- Protection des composants électroniques contre l'eau et l'humidité.
- Amélioration de la durée de vie de système.

III.5. Conception logicielle

III.5.1. Introduction à la solution logicielle

Passons maintenant à la partie logicielle de notre projet. Nous avons développé une application embarquée robuste sous environnement Arduino, optimisée pour l'ESP32 et le modem SIM7600.

Le cœur du programme repose sur une exécution asynchrone. Grâce à l'utilisation de Timers logiciels et d'interruptions matérielles pour le capteur de vibrations, notre système reste constamment en éveil. Il interroge les capteurs et publie les métriques de température, vitesse et position sur notre Cloud Adafruit IO via le protocole MQTT.

L'aspect critique de notre code réside dans son algorithme de sécurité. Si un seuil est franchi, ou si le véhicule sort des limites géographiques de la Wilaya d'Oran que nous avons configurées par Geofencing, le programme réagit instantanément. Il pilote un relais pour couper la pompe de carburant, déclenche une alarme sonore et visuelle, et utilise les commandes AT du modem pour envoyer un SMS d'alerte détaillé au chauffeur s'il n'est pas au niveau de camion. Tout cela est protégé par un système anti-rebond pour éviter l'envoi massif de SMS.

III.5.2. Environnement de développement : Arduino IDE

L'Arduino IDE « Integrated Development Environment » est l'outil logiciel officiel qui permet de programmer les cartes de développement. C'est l'interface entre l'ordinateur et le matériel.

III.5.2.1. Décomposition de l'Arduino IDE

III.5.2.1.1. Un éditeur de texte spécialisé

C'est là où on écrit le code qui appelé Sketch. Le langage utilisé est basé sur le C/C++, mais simplifié pour être accessible aux débutants. L'IDE propose la coloration syntaxique, ce qui permet de repérer facilement les erreurs et de différencier les fonctions des variables.

III.5.2.1.2. Le compilateur

Une fois le code écrit, l'ordinateur ne peut pas le lire tel quel. Le bouton Vérifier de l'IDE utilise un compilateur qui traduit votre texte en langage machine (code binaire) que le microcontrôleur de la carte peut comprendre.

III.5.2.1.3. Le téléchargeur (Uploader)

Une fois compilé, l'IDE envoie ce programme vers notre carte via un câble USB. C'est l'étape finale qui rend le projet autonome.

III.5.2.2. Les composants clés de l'interface

- La Barre d'outils : Elle contient les boutons essentiels pour vérifier le code, le téléverser, créer un nouveau fichier ou ouvrir un exemple.
- La Zone d'édition : L'espace principal pour rédiger les fonctions setup () et Loop ().
- La Console (ou Zone de notification) : En bas de la fenêtre, elle affiche les messages d'erreur.
- Le Moniteur Série : Une petite fenêtre séparée qui permet de discuter avec la carte en temps réel.



Figure III. 14 : Arduino IDE

Le choix de l'Arduino IDE s'est imposé par sa flexibilité et la richesse de son écosystème de bibliothèques. Cet environnement permet une gestion de bas niveau des périphériques matériels tout en utilisant un langage de haut niveau (C++).

- **Multiplateforme** : Il fonctionne sur Windows, macOS et Linux.
- **Gestionnaire de Bibliothèques** : Il permet d'installer en un clic des morceaux de code pré-écrits pour gérer des capteurs complexes (comme un MPU6500), des écrans ou des modules Wi-Fi (comme l'ESP32).
- **Gratuit et Open Source** : Tout le monde peut l'utiliser et contribuer à son amélioration.

III.5.3. Développement du micrologiciel (Firmware)

Le cœur applicatif réside dans l'ESP32. Le micrologiciel suit une logique séquentielle optimisée pour garantir la disponibilité du système :

III.5.3.1. Les routes (Protocoles de communication)

Ce ne sont pas des programmes, mais des méthodes de branchement et de discussion entre les composants électroniques.

1.UART « Universal Asynchronous Receiver-Transmitter » : Il convertit les données parallèles (que le processeur utilise en interne) en données série (bit par bit, les uns après les autres) pour les envoyer sur un seul fil, et inversement à la réception.

C'est comme un talkie-walkie entre deux composants par exemple entre notre ESP32 et le GPS. Ça utilise deux fils : un pour envoyer (TX) et un pour recevoir (RX).[57]

III.5.3.2. La langue (Format de données)

Le programme effectue une scrutation périodique des capteurs, traite les signaux bruts et les formate en paquets JSON « JavaScript Object Notation » ou structures simples avant transmission.

Le JSON est un format textuel utilisé pour stocker et échanger des données. Même s'il vient du monde JavaScript, il est universel et lu par presque tous les langages de programmation (Python, C++, etc.).

Il transmette des données entre un serveur et une application web, ou à sauvegarder des fichiers de configuration.

III.5.3.3. Le Firmware

Le Firmware est le système d'exploitation que nous téléchargeons dans la mémoire de l'ESP32 (notre code Arduino).

Son rôle est d'exploiter les différents outils selon les étapes suivantes : requête de la température auprès du capteur, conversion de la valeur numérique au format JSON, et transmission finale vers l'ordinateur par liaison UART.

III.5.4. Protocole de communication et connectivité

Le MQTT « Message Queuing Telemetry Transport » est un protocole de communication de type Publish-Subscribe. C'est le standard de messagerie pour l'Internet des Objets (IoT) car il est conçu pour être extrêmement léger, simple à implémenter et efficace, même sur des réseaux instables ou avec des appareils à faible puissance.

III.5.4.1. L'architecture : Client et Broker

Contrairement au modèle HTTP classique où un client parle directement à un serveur, le MQTT utilise un intermédiaire central appelé le Broker.

- Le Broker : Il reçoit tous les messages, les filtre et les renvoie aux clients qui en ont besoin.
- Les Clients:Ce sont les capteurs, les machines ou les applications mobiles. Ils ne communiquent jamais directement entre eux.

III.5.4.2. Le mécanisme : Publish / Subscribe

La communication est basée sur des Topics, structurés comme des chemins de dossiers (ex: usine/secteur1/température).

- S'abonner (Subscribe) : Un client dit au Broker : On veut recevoir les données du topic usine/secteur1/température.
- Publier (Publish) : Un autre client envoie une donnée (ex: 25°C) vers ce même topic.
- Distribution : Le Broker voit qui est abonné à ce topic et leur transmet immédiatement l'information.

III.5.4.3. Les avantages clés

La liaison entre l'unité embarquée et le Cloud repose sur le protocole MQTT. Ce choix est justifié par ses caractéristiques techniques adaptées aux contraintes de notre projet :

- Légèreté : L'entête d'un message MQTT est très petite (environ 2 octets), ce qui économise de la bande passante et de la batterie.
- Communication bidirectionnelle : Il est aussi facile pour un capteur d'envoyer une donnée que pour un serveur de lui envoyer une commande.
- Qualité de Service (QoS) : MQTT permet de choisir le niveau de fiabilité de la livraison :
 - QoS 0 : Le message est envoyé une fois, sans garantie de réception.
 - QoS 1 : Le message est livré au moins une fois (peut être dupliqué).
 - QoS 2 : Le message est livré exactement une fois (le plus sécurisé, mais plus lent).
- Architecture Publish/Subscribe : L'ESP32 agit en tant que Publisher, envoyant les données vers des Topics spécifiques, tandis qu'Adafruit IO assure le rôle de Broker.

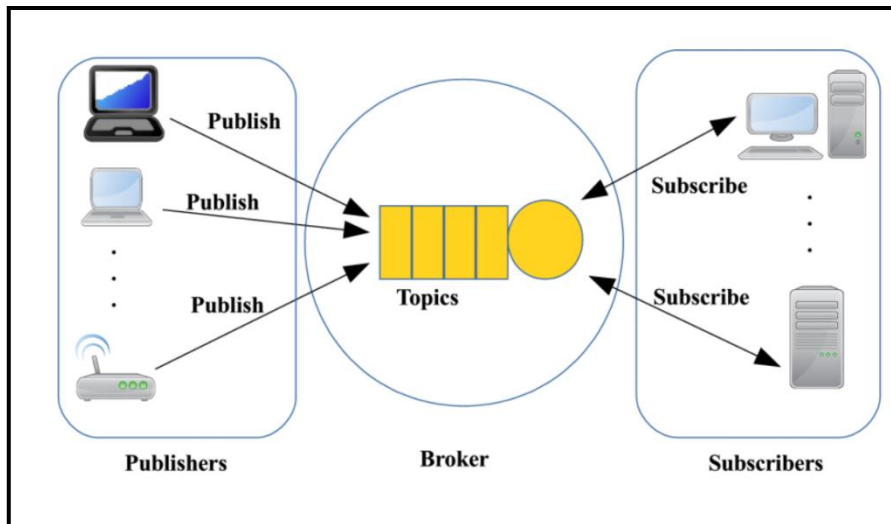


Figure III. 15 : Architecture de MQTT. [22]

III.5.5. Supervision et visualisation : Adafruit IO

La partie haute de notre architecture est constituée par la plateforme Adafruit IO. Elle remplit les fonctions de serveur de stockage et d'interface homme-machine (IHM).

Adafruit IO est une plateforme de type PaaS « Platform as a Service » dédiée à l'Internet des Objets. Elle agit comme un Broker intermédiaire entre le matériel physique et l'interface utilisateur.

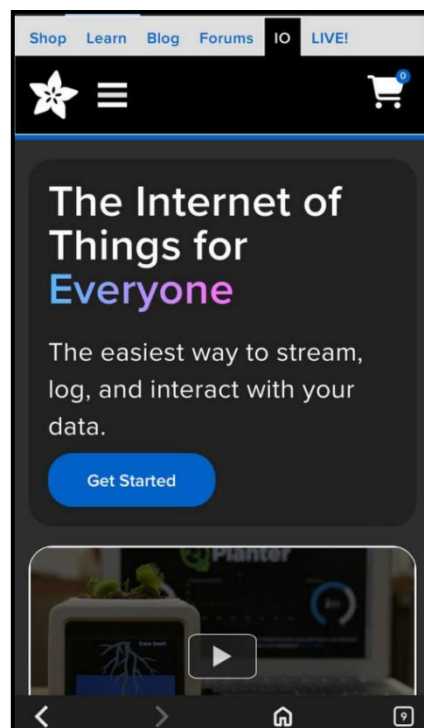


Figure III. 16 : Page d'acquisition du Adafruit IO sur le smartphone

L'architecture repose sur deux piliers que tu dois détailler :

- Les Feeds (Flux) : Chaque variable (position GPS, température, ...ex) est associée à un flux unique, permettant un archivage historique des données. C'est une structure de donnée temporelle (time-series).
- Interface de contrôle (Dashboard) : Un tableau de bord dynamique (L'interface de visualisation) a été conçu pour transformer les données brutes en informations exploitables: cartographie en temps réel, jauges d'alertes, graphiques de tendance.
- Sécurité des échanges : L'accès aux services cloud est sécurisé par une authentification par clé API unique, garantissant l'intégrité et la confidentialité des données transmises.

Le choix du plateforme Adafruit IO s'est imposé par :

- Rapidité de prototypage : Permet de se concentrer sur l'intelligence du système plutôt que sur la gestion des serveurs.
- Scalabilité : Passage facile d'un seul capteur à une flotte d'appareils.
- Accessibilité des données : API REST complète permettant d'extraire les données pour des analyses ultérieures (sur Excel, Python, etc.).

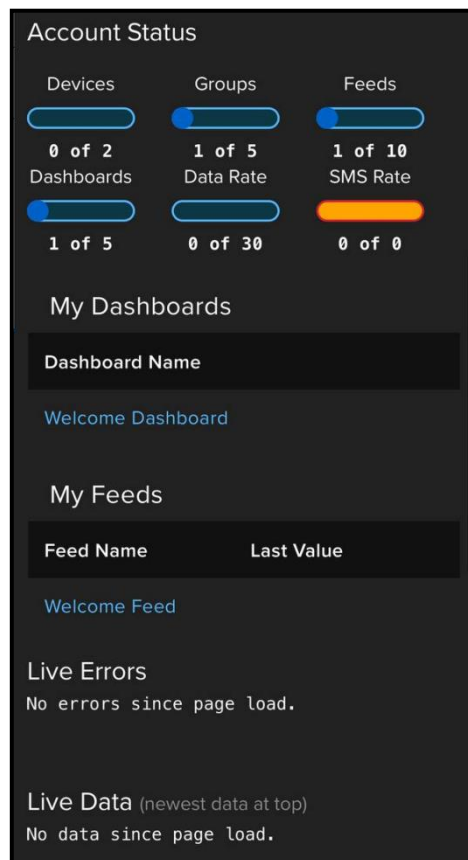


Figure III. 17 : Un compte sur Adafruit IO

Chapitre IV :
Réalisation, simulation et
validation

IV.1. Introduction

Le présent chapitre constitue l'aboutissement concret de l'ensemble des travaux de conception exposés dans le chapitre précédent. Après avoir défini les exigences fonctionnelles du système, sélectionné les composants matériels et établi l'architecture logicielle, nous abordons ici la phase de réalisation, de tests et de validation du prototype développé.

L'objectif de ce chapitre est triple. Dans un premier temps, nous décrivons la mise en œuvre physique du système embarqué, en présentant le montage du prototype, le schéma de câblage détaillé et son intégration dans un boîtier étanche adapté aux contraintes industrielles. Dans un second temps, nous détaillons le développement du logiciel embarqué, en explicitant les choix algorithmiques retenus pour garantir la robustesse et la réactivité du système en conditions réelles. Enfin, nous exposons les résultats expérimentaux obtenus lors des phases de tests, et nous procédons à une validation systématique des objectifs fixés en début de projet.

Ce chapitre répond ainsi à une question fondamentale : le système conçu est-il capable d'assurer, de manière fiable et continue, la traçabilité et la visibilité en temps réel d'un camion-citerne transportant du gaz naturel, tout en garantissant la sécurité active de la cargaison et du conducteur ?

IV.2. Réalisation du prototypage

IV.2.1. Montage physique et interconnexions

La phase de réalisation matérielle a consisté à assembler l'ensemble des composants électroniques retenus lors de la conception sur une Breadboard de prototypage, avant leur intégration dans le boîtier étanche définitif. La carte ESP32 TTGO LTE GPS SIM7600 constitue l'unité centrale du système, autour de laquelle gravitent les différents capteurs et actionneurs. L'interfaçage des périphériques a été conçu de manière à isoler les bus de communication et à maximiser la fidélité des signaux collectés :

- Capteur de température DS18B20 (Sonde étanche) : Il est raccordé au port numérique GPIO 15 de l'ESP32. Pour garantir la stabilité des lectures numériques sur le bus de communication One-Wire, une résistance de tirage (pull-up) de 4.7k Ohm est insérée entre la ligne de données et la ligne d'alimentation 3.3V.
- Capteur de vibration SW-420 : Ce module à haute sensibilité est connecté directement à la broche GPIO 14 de l'ESP32. Son alimentation est repiquée sur le rail 3.3V de la plaque de prototypage (breadboard).
- Dispositifs d'actionnement et d'alerte locale : Le buzzer actif et la LED rouge (associée à une résistance de limitation de courant) sont respectivement pilotés par des broches de sortie numérique (pin 12/pin13) spécifiques pour matérialiser l'alarme en cabine.
- Actionneur de sécurité (Relais) : Le module relais électromécanique est interfacé avec l'ESP32 (sur le pin 18) pour jouer le rôle d'interrupteur électronique de puissance il associer avec une LED verte qui joue le rôle de la pompe d'essence. En situation nominale,

le relais maintient le circuit de commande de l'électrovanne/pompe de carburant fermé (état normalement fermé). L'excitation de la bobine du relais par un signal haut (HIGH) déclenche l'ouverture mécanique du circuit, coupant instantanément l'alimentation en carburant du véhicule.

- Multiplexage de la communication série (SerialAT) : Afin de préserver le port série principal dédié au téléversement et au débogage USB, un port matériel customisé (Hardware Serial SerialAT (1)) a été instancié sur les broches GPIO 26 (RX) et 27 (TX) pour piloter exclusivement les échanges de commandes AT avec le modem cellulaire SIM7600.

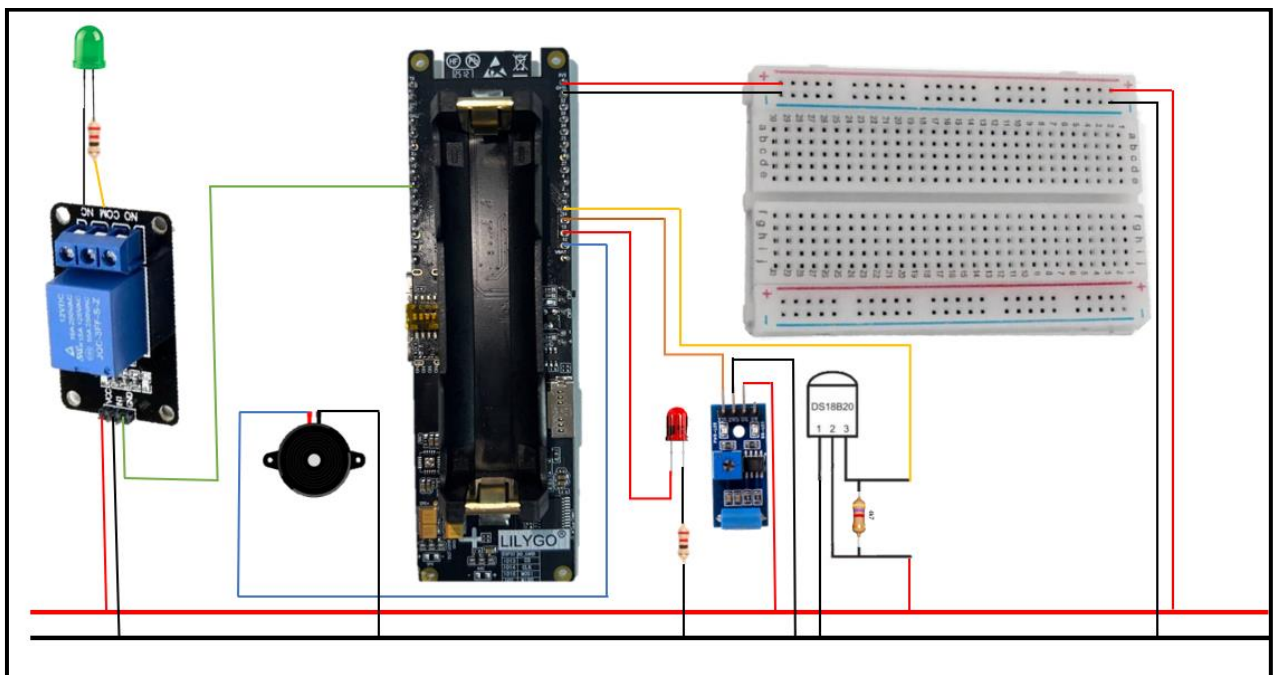


Figure IV. 1 : câblage final assemblé

IV.2.2. Schéma de câblage détaillé

Le schéma de câblage illustre l'ensemble des connexions électriques entre l'unité centrale ESP32 TTGO SIM7600 et les composants périphériques. Chaque broche GPIO utilisée a été sélectionnée en tenant compte des contraintes de multiplexage du microcontrôleur et des protocoles de communication requis par chaque composant.

Tableau IV.1 : Les branche des matériaux avec l'ESP32

Composant	Type de signal	Broche ESP32	Protocole
DS18B20 (température)	Numérique	GPIO 15	OneWire
SW-420 (vibration)	Numérique	GPIO 14	ISR matérielle
SIM7600 (4G + GPS)	Série UART	GPIO 26/27	UART (SerialAT)

Relais coupure moteur	Sortie numérique	GPIO 18	Tout ou Rien
Buzzer actif	Sortie numérique	GPIO 12	Tout ou Rien
LED rouge d'alerte	Sortie numérique	GPIO 13	Tout ou Rien

IV.2.3. Intégration dans le boîtier industriel étanche

Le déploiement en environnement logistique réel (vibrations mécaniques permanentes, projections d'eau, poussières et amplitudes thermiques élevées) impose une protection rigoureuse de l'électronique embarquée. Les composants (ESP32, breadboard, connectiques et circuits de puissance) ont été intégrés au sein d'un boîtier durci et hermétique.

Les antennes externes (antenne LTE pour le réseau cellulaire 4G et antenne active pour la synchronisation des coordonnées GPS par satellite) sont déportées et solidement fixées à l'extérieur du boîtier pour éviter l'effet de cage de Faraday et garantir une excellente qualité de signal. Le système embarqué intègre son propre module d'alimentation par batterie lithium-ion (type 18500/18650 logé à l'arrière de la carte), conférant au dispositif une autonomie énergétique totale, indépendante du circuit électrique du camion.

IV.3. Logique applicative et Firmware embarqué

IV.3.1. Synthèse fonctionnelle

Le micrologiciel (Firmware) exécuté par l'ESP32 a été développé sous l'environnement Arduino IDE en langage C++. Le code a été optimisé pour répondre à des impératifs industriels de robustesse, de réactivité immédiate face au danger et d'économie de bande passante réseau.

L'ensemble logiciel et matériel assure quatre fonctions principales :

- Télémétrie multi-capteurs : Surveillance continue et en temps réel des paramètres physiques du véhicule et de sa cargaison, incluant la température ambiante (capteur DS18B20), l'activité dynamique et les chocs (capteur de vibration SW-420), ainsi que la vitesse cinématique et les coordonnées géographiques par satellite (GPS).
- Connectivité Cloud : Transmission asynchrone et sécurisée des métriques collectées vers le broker cloud Adafruit IO. Cette communication s'appuie sur la légèreté du protocole MQTT et transite par une liaison de données cellulaires GPRS.
- Le Geofencing (Gardiennage virtuel) : Implémentation d'un algorithme de surveillance spatiale qui confronte en permanence les coordonnées GPS du véhicule aux limites géographiques de la Wilaya d'Oran, validant ainsi la conformité de l'itinéraire.
- Sécurité active et réactivité : En cas de franchissement des seuils critiques prédéfinis (Vitesse > 80 km/h, Température > 30 C, ou détection d'un choc majeur), l'algorithme bascule instantanément en mode de sécurité et déclenche une triple action simultanée :

1. Alerte locale : Activation visuelle et sonore en cabine par le clignotement d'une LED rouge et l'émission de bips via un buzzer.
2. Actionneur de sécurité (Coupure moteur) : Commande d'un relais de puissance pilotant une électrovanne/pompe. Cette action interrompt l'alimentation en carburant (mazout ou essence) afin de provoquer l'arrêt automatique et sécurisé du moteur.
3. Alerte distante : Génération et envoi immédiat d'un SMS d'urgence automatisé sur le téléphone du chauffeur pour lui notifier la nature exacte de l'anomalie.

```
5  #include <Adafruit_MQTT.h>
6  #include <Adafruit_MQTT_Client.h>
7  #include <OneWire.h>
8  #include <DallasTemperature.h>
9  #include <Arduino.h>
10
11 // --- Alert SMS ---
12 const char CHAUFFEUR_TEL[] = "+213773400653"; // Remplacer par le numéro de téléphone réel du c
13 bool smsSent = false; // Permet d'envoyer un seul SMS par événement d'alerte
14
15 // --- Configuration SIM7600 (TTGO) ---
16 #define MODEM_TX 27
17 #define MODEM_RX 26
18 #define MODEM_PWRKEY 4
19 #define MODEM_STATUS 34
20
21 // --- Network ---
22 const char apn[] = "internet";
23 const char gprsUser[] = "";
24 const char gprsPass[] = "";
```

Output Serial Monitor X

Not connected. Select a board and a port to connect automatically.

```
19:29:16.961 -> SMS envoyé avec succès au chauffeur !
19:29:36.409 -> ALERTE: Température critique!
19:29:56.400 -> ALERTE: Température critique!
19:30:16.454 -> ALERTE: Température critique!
19:30:36.437 -> ALERTE: Température critique!
19:30:56.455 -> ALERTE: Température critique!
19:37:37.617 -> ALERTE: Vibration excessive!
19:37:37.729 -> Préparation de l'envoi du SMS...
19:37:38.117 -> SMS envoyé avec succès au chauffeur !
19:37:57.639 -> ALERTE: Vibration excessive!
19:37:57.639 -> Préparation de l'envoi du SMS...
19:37:58.173 -> SMS envoyé avec succès au chauffeur !
```

Figure IV. 2 : les données de la sortie dans le série .

IV.3.2. Optimisations logicielles et choix de conception

Afin de garantir la robustesse, la réactivité et la stabilité du système embarqué face aux contraintes du temps réel et de la communication cellulaire, plusieurs optimisations algorithmiques avancées ont été implémentées.

IV.3.2.1. Gestion des tâches asynchrones sans blocage (millis ())

L'une des contraintes majeures de notre système est la gestion simultanée de tâches ayant des fréquences différentes (télémetrie toutes les 10 à 20 secondes) tout en maintenant une écoute active des alertes.

L'utilisation d'instructions bloquantes classiques, telles que la fonction `DeLay ()`, aurait paralysé le microcontrôleur pendant les phases d'attente, rendant le système incapable de réagir immédiatement à un événement critique ou de maintenir la connexion MQTT. Pour pallier ce problème, une architecture multitâche coopérative basée sur des Timers logiciels via la fonction native `millis ()` a été développée. Cette approche permet au processeur de vérifier en continu si le temps imparti pour une tâche est écoulé, tout en exécutant le reste du code en arrière-plan. La réactivité globale du système s'en trouve ainsi pleinement garantie, notamment lors des requêtes réseau GPRS qui s'exécutent de manière totalement transparente.

IV.3.2.2. Utilisation des interruptions matérielles (ISR)

Les chocs et vibrations subis par le véhicule sont des phénomènes physiques transitoires et extrêmement brefs, pouvant durer à peine quelques millisecondes. Une simple lecture séquentielle (polling) dans la boucle principale aurait présenté un risque élevé de rater ces impulsions critiques.

Pour sécuriser cette capture, la détection des vibrations a été déléguée à une interruption matérielle via la fonction `attachInterrupt()`. Dès qu'un signal est généré par le capteur, le processeur suspend temporairement sa tâche courante pour incrémenter le compteur d'impulsions à travers la routine d'interruption (ISR) `isr_vibration()`.

De plus, afin d'optimiser les performances, cette fonction a été qualifiée avec l'attribut `IRAM_ATTR`. Cela force son stockage dans la mémoire RAM interne du microcontrôleur plutôt que dans la mémoire Flash. Cette configuration assure un temps d'accès ultra-rapide et immunise le système contre les crashes processeur (conflits d'accès) qui pourraient survenir si une interruption se déclenchait pendant que la mémoire Flash est occupée à dialoguer avec le modem SIM7600.

IV.3.2.3. Sécurité anti-spam pour les SMS

L'envoi d'un SMS via les commandes AT du modem est une opération lourde qui requiert du temps et des ressources réseau. Si le système se contentait de vérifier les seuils critiques à chaque cycle de la boucle `Loop ()`, la détection d'une alerte prolongée (par exemple, une température restant supérieure à 30°C pendant plusieurs minutes) déclencherait l'envoi de centaines de SMS en continu.

Pour éviter cette situation critique, une machine d'état logique exploitant un indicateur booléen (`smsSent`) a été intégrée. Ce mécanisme agit comme un filtre anti-spam logiciel : lorsqu'une alerte est détectée, le système vérifie l'état du drapeau. Le SMS n'est envoyé que si `smsSent` est à l'état *FAUX*. Une fois le message transmis avec succès au chauffeur, le drapeau bascule à l'état *VERAI*, bloquant toute nouvelle tentative d'envoi. Le système est réinitialisé dès que les paramètres du véhicule repassent sous les seuils d'alerte. Cette optimisation logicielle protège le modem de la saturation, préserve la bande passante et évite l'épuisement inutile du crédit de la carte SIM.

IV.3.2.4. Utilisation de ports Serial customisés

Pour éviter tout conflit sur le bus de communication principal et permettre le débogage en temps réel sur l'ordinateur, j'ai configuré un port Serial customisé grâce à la flexibilité du

multiplexage des broches de notre microcontrôleur. En instanciant Hardware Serial SerialAT (1) sur les broches GPIO 26 et 27, j'ai créé une ligne de communication série totalement dédiée et isolée pour l'échange des commandes AT avec le modem SIM7600, Sécurité anti-spam pour les SMS

IV.3.3. Architecture et Structure du Programme Embarqué

Le code source développé pour ce système a été structuré de manière modulaire afin de garantir la clarté de l'algorithme, la maintenabilité du système et une exécution asynchrone performante. La logique globale du logiciel est segmentée en trois grandes parties fonctionnelles :

IV.3.3.1. Configuration et Initialisation du Système (setup)

Cette première phase, exécutée une seule fois au démarrage du microcontrôleur, assure la mise sous tension et la configuration des composants périphériques :

- Initialisation du modem SIM7600 : Activation matérielle via la broche MODEM_PWRKEY et configuration du bus série dédié (SerialAT) à une vitesse de 115200 bauds.
- Démarrage des services réseaux : Activation du récepteur GPS intégré par la commande AT +CGPS=1, suivie de la connexion au réseau cellulaire GPRS via l'APN configuré.
- Initialisation des capteurs et actionneurs : Configuration du bus *One Wire* pour le capteur de température DS18B20, attachement de l'interruption matérielle (ISR) pour le capteur de vibration, et mise à l'état initial des sorties (relais de coupure, LED et buzzer désactivés).



```

code_complet_avec_relais.ino
123
124 void setup() {
125     Serial.begin(115200);
126     pinMode(MODEM_PWRKEY, OUTPUT);
127     digitalWrite(MODEM_PWRKEY, LOW);
128     delay(100);
129     digitalWrite(MODEM_PWRKEY, HIGH);
130     delay(1000);
131     digitalWrite(MODEM_PWRKEY, LOW);
132
133     SerialAT.begin(115200, SERIAL_8N1, MODEM_RX, MODEM_TX);
134
135     if (!modem.restart()) {
136         Serial.println("Échec Modem");
137     } else {
138         modem.sendAT("+CGPS=1");
139         modem.waitResponse();
140         modem.gprsConnect(apn, gprsUser, gprsPass);
141     }
142
143     sensors.begin();
144     pinMode(VIBRATION_PIN, INPUT_PULLUP);
145
146     // Configuration des sorties d'alarme
147     pinMode(RED_LED_PIN, OUTPUT);
148     pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
149     digitalWrite(RED_LED_PIN, LOW);
150     noTone(BUZZER_PIN); // Sécurité : s'assure que le buzzer est bien éteint au démarrage
151
152     // --- AJOUT RELAIS : Configuration de la broche du relais ---
153     pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
154     digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Par défaut, relais inactif (l'électrovanne reste ouverte, moteur alimenté)
155
156     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(VIBRATION_PIN), isr_vibration, RISING);
157
158     Serial.println("--- Système avec Alarme LED/Buzzer, SMS & Coupure Relais Prêt ---");
159 }
160
  
```

Figure IV. 3 : le programme de setup

IV.3.3.2. La boucle principale et gestion temporelle (Loop)

Pour éviter l'utilisation de fonctions bloquantes telles que `DeLay ()` qui paralyseraient le processeur, la boucle principale repose sur une architecture multitâche coopérative gérée par des timers logiciels `millis ()`. L'exécution des tâches se fait selon des intervalles précis :

- Tâche Télémétrie Chocs chaque 10s : Lecture du compteur d'impulsions généré par l'interruption du capteur de vibration, réinitialisation du compteur et publication sur le feed MQTT.
- Tâche Géo sécurisation et Vitesse chaque 20s : Acquisition des données GPS (Latitude, Longitude, Vitesse). C'est ici qu'est appliqué l'algorithme de Geofencing pour vérifier si le véhicule se trouve toujours dans les limites géographiques de la Wilaya d'Oran, ainsi que le contrôle du dépassement de la vitesse limite (80 km/h).
- Tâche Télémétrie Température chaque 20s : Requête et lecture de la température ambiante de la cargaison et envoi de la mesure au broker Adafruit IO.

L'enchaînement logique de ces tâches et les conditions de transition vers l'état d'alarme sont illustrés par l'organigramme Flowchart

IV.3.3.3. Algorithme de sécurité et protocole d'alerte

Cette section gère la réactivité du système face aux anomalies. Lorsqu'un seuil critique est franchi (surchauffe, choc violent, excès de vitesse ou sortie de zone), le programme bascule en mode d'alerte et exécute simultanément trois actions :

1. Alerte locale : Activation d'un clignotement asynchrone de la LED rouge et émission de bips sonores via le buzzer.
2. Sécurité active (Coupure moteur) : Commande du relais (RELAY_PIN à l'état HAUT) pour fermer la pompe de carburant, entraînant l'arrêt automatisé du moteur.

```

232 // --- GESTION DE L'ALARME PHYSIQUE, RELAIS & SMS ---
233 if (tempAlertActive || vibAlertActive || speedAlertActive) {
234
235     // --- AJOUT RELAIS : Activation du relais pour fermer l'électrovanne (coupure mazout) ---
236     // Remarque : Si ton module relais s'active à l'état BAS (Active Low), remplace HIGH par LOW.
237     digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
238
239     // Clignotement asynchrone LED Rouge et bips Buzzer avec TONE
240     if (currentTime - lastAlarmBlink >= blinkInterval) {
241         lastAlarmBlink = currentTime;
242         ledState = !ledState;
243
244         digitalWrite(RED_LED_PIN, ledState);
245
246         if (ledState) {
247             tone(BUZZER_PIN, 1500);
248         } else {
249             noTone(BUZZER_PIN);
250         }
251     }
252
253     // Logique d'envoi du SMS d'alerte (sécurité anti-spam)
254     if (!smsSent) {
255         String msg = "ALERTE CRITIQUE VEHICULE : ";
256
257         if (tempAlertActive) msg += "[Température critique (>30C)] ";
258         if (vibAlertActive) msg += "[Choc/Vibrations] ";
259         if (speedAlertActive) msg += "[Vitesse excessive] ";
260
261         msg += "Moteur coupé automatiquement pour sécurité. Veuillez vérifier le véhicule.";
262
263         envoyerSMS(msg);
264         smsSent = true;
265     }
266 } else {
267     // --- AJOUT RELAIS : Désactivation du relais (le mazout circule à nouveau normalement) ---
268     digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
269
270     // Extinction complète des alarmes physiques quand tout est OK
271     digitalWrite(RED_LED_PIN, LOW);
272     noTone(BUZZER_PIN);
273
274     smsSent = false;
275 }

```

Figure IV. 4 : code des anomalies

3. Alerte distante (SMS) : Appel de la fonction dédiée envoyer SMS (). Celle-ci configure le modem en mode texte (+CMGF=1), définit l'encodage des caractères, transmet le numéro du chauffeur via +CMGS, puis injecte le texte d'alerte avant de valider l'envoi par le

caractère ASCII 26. Un mécanisme d'anti-rebond matériel/logiciel (smsSent) est intégré pour éviter la saturation du réseau.

```
11 // --- Alert SMS ---  
12 const char CHAUFFEUR_TEL[] = "+213[REDACTED]"; // Remplacer par le numéro de téléphone réel du chauffeur  
13 bool smsSent = false; // Permet d'envoyer un seul SMS par événement d'alerte
```

Figure IV. 5 : script de SMS alerte sur Arduino IDE

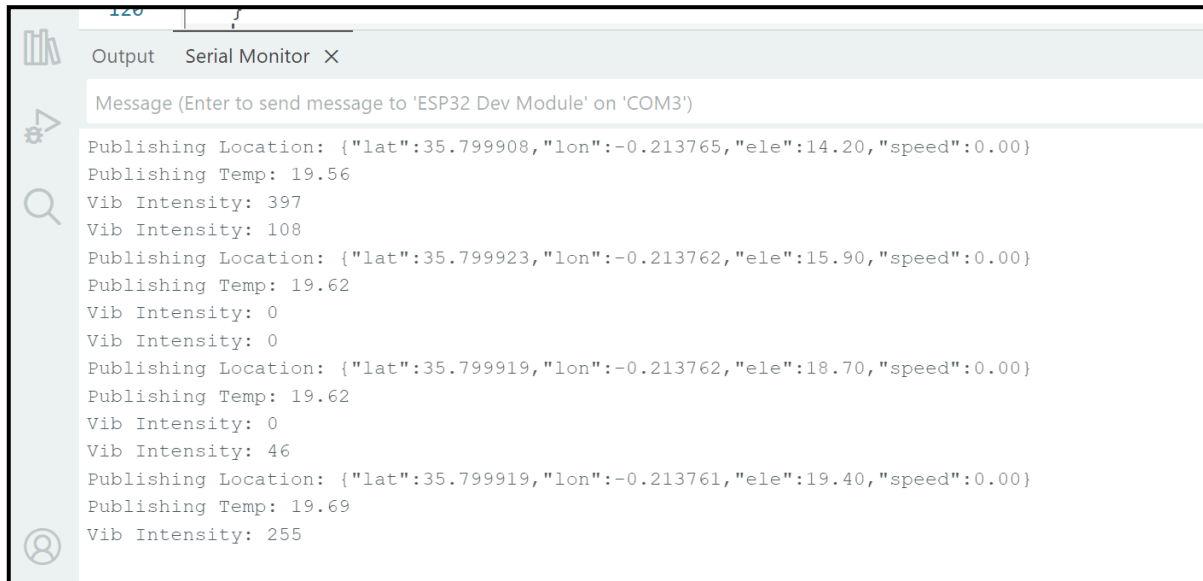


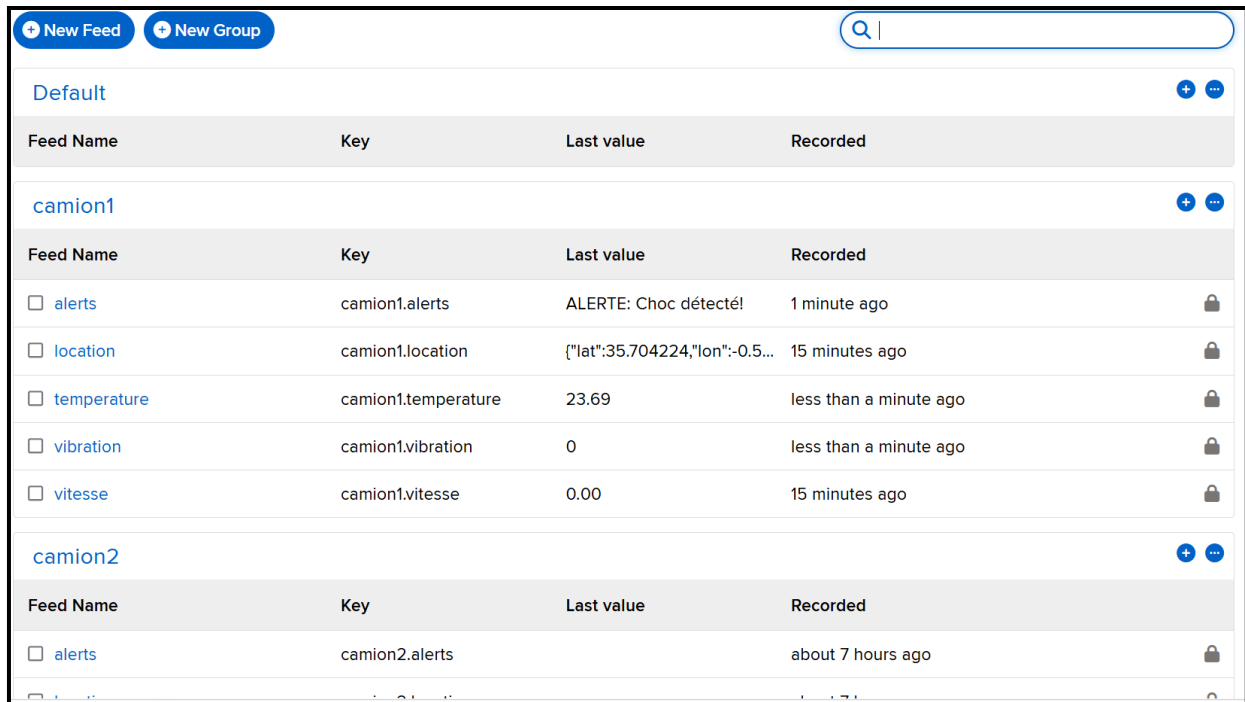
Figure IV. 6 : affichage des résultats sur la série

IV.4. Supervision en temps réel et simulation Cloud

La partie haute de notre architecture logicielle s'appuie sur la suite IoT Adafruit IO, exploitée ici comme broker MQTT et serveur d'interface homme-machine (IHM). L'authentification et l'intégrité des flux de données entre l'unité embarquée ESP32 et le Cloud sont sécurisées par l'utilisation d'une clé API unique.

IV.4.1. Structuration des flux de données (Feeds)

D'abord en créer des groupes (chaque camion) pour gère l'ensemble des Feeds



Feed Name	Key	Last value	Recorded
Default			
camion1			
☐ alerts	camion1.alerts	ALERTE: Choc détecté!	1 minute ago
☐ location	camion1.location	{"lat":35.704224,"lon":-0.5...	15 minutes ago
☐ temperature	camion1.temperature	23.69	less than a minute ago
☐ vibration	camion1.vibration	0	less than a minute ago
☐ vitesse	camion1.vitesse	0.00	15 minutes ago
camion2			
☐ alerts	camion2.alerts		about 7 hours ago

Figure IV. 7 : les groupes et les flux sur Adafruit IO

Les informations physiques collectées par le micrologiciel sont encapsulées puis publiées vers des flux de données temporels indépendants (*Time-Series Feeds*) configurés sur le broker :

- Location : Reçoit les paquets contenant les coordonnées de géolocalisation (latitude/longitude/vitesse) interprétés dynamiquement par l'API cartographique.

Created at	Value	Location
2026/05/18 11:33:58AM	View {"lat":35.641739,"lon":-0.615028}	35.641739, -0.615028
2026/05/18 11:33:38AM	View {"lat":35.641342,"lon":-0.615133}	35.641342, -0.615133
2026/05/18 11:33:18AM	View {"lat":35.641518,"lon":-0.615056}	35.641518, -0.615056
2026/05/18 11:32:58AM	View {"lat":35.641788,"lon":-0.614834}	35.641788, -0.614834
2026/05/18 11:32:38AM	View {"lat":35.641590,"lon":-0.614954}	35.64159, -0.614954
2026/05/18 11:32:18AM	View {"lat":35.641224,"lon":-0.615242}	35.641224, -0.615242
2026/05/18 11:31:58AM	View {"lat":35.641392,"lon":-0.614953}	35.641392, -0.614953
2026/05/18 11:31:38AM	View {"lat":35.641411,"lon":-0.615036}	35.641411, -0.615036
2026/05/18 11:31:18AM	View {"lat":35.641850,"lon":-0.614766}	35.64185, -0.614766
2026/05/18 11:27:58AM	View {"lat":35.641331,"lon":-0.614815}	35.641331, -0.614815
2026/05/18 11:27:38AM	View {"lat":35.641354,"lon":-0.614869}	35.641354, -0.614869

Figure IV. 8 : affichage des cordonné de la localisation

- Température : Enregistre l'historique thermique continu de la cargaison gazeuse.

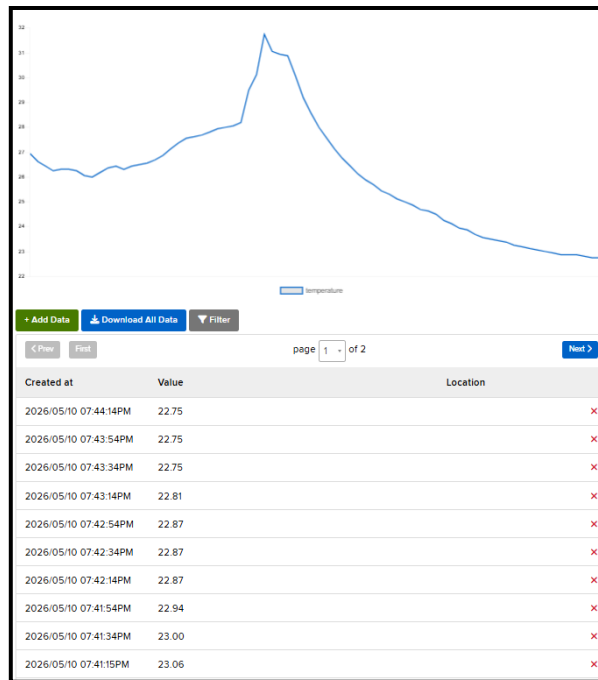


Figure IV. 9 : historique et la courbe d'historique de la température

- Vibration : Stocke la valeur numérique reflétant l'intensité des secousses ou des chocs détectés.

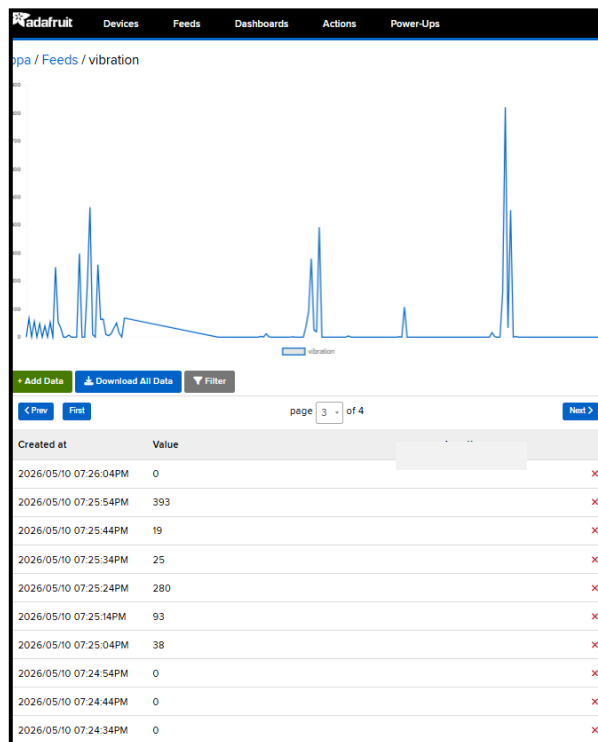


Figure IV. 10 : Historique et la courbe d'historique des valeurs du vibration

- Alertes : Flux d'état textuel dédié à l'archivage chronologique et à l'affichage des notifications d'anomalies.

2026/04/29 02:17:01PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×
2026/04/29 02:16:41PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×
2026/04/29 02:16:31PM	ALERTE: Choc détecté!	×
2026/04/29 02:16:01PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×
2026/04/29 02:15:41PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×
2026/04/29 02:15:21PM	View ALERTE: Température > 30°C	×
2026/04/29 02:15:21PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×
2026/04/29 02:15:01PM	View ALERTE: Température > 30°C	×
2026/04/29 02:15:01PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×
2026/04/29 02:14:41PM	View ALERTE: Température > 30°C	×
2026/04/29 02:14:41PM	View ALERTE: Le véhicule a quitté Oran	×

Figure IV. 11 : Historique des alertes

- Vitesse : enregistrer l'historique de la vitesse et affichage ces valeurs.

Created at	Value
2026/05/18 11:32:18AM	0.80
2026/05/18 11:31:58AM	1.90
2026/05/18 11:31:38AM	1.70
2026/05/18 11:31:18AM	1.40
2026/05/18 11:27:58AM	2.80
2026/05/18 11:27:38AM	3.60
2026/05/18 11:19:17AM	0.00
2026/05/18 11:18:57AM	0.00
2026/05/18 11:18:37AM	1.30
2026/05/18 11:18:17AM	1.60
2026/05/18 11:17:57AM	1.30
2026/05/18 11:17:37AM	2.30
2026/05/18 11:17:17AM	1.90
2026/05/18 11:16:57AM	2.30
2026/05/18 11:16:37AM	0.00

Figure IV. 12 : Historique des valeurs du vitesse

IV.4.2. Analyse du Tableau de Bord du Contrôle

L'interface graphique a été structurée à l'aide de blocs visuels interactifs afin de fournir une aide à la décision immédiate pour un gestionnaire de réseau logistique.

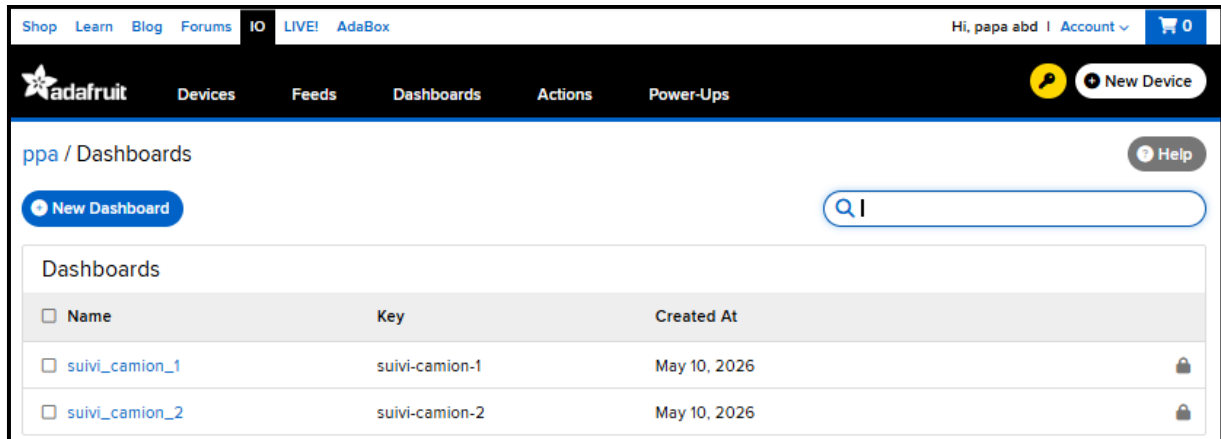


Figure IV. 13 : liste des Dashboard DE supervision des camions

Le Bloc Cartographique (Map Widget) : Exploitant l'API OpenStreetMap, il affiche en temps réel la position exacte du camion-citerne ainsi que son tracé historique.

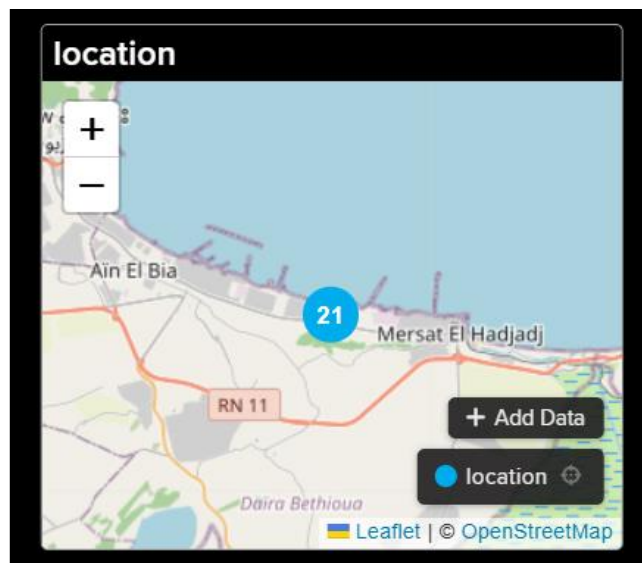


Figure IV. 14 : Affichage OpenStreetMap via la plateforme Adafruit IO

Les tests pratiques démontrent une mise à jour fluide de la position toutes les 30 secondes.

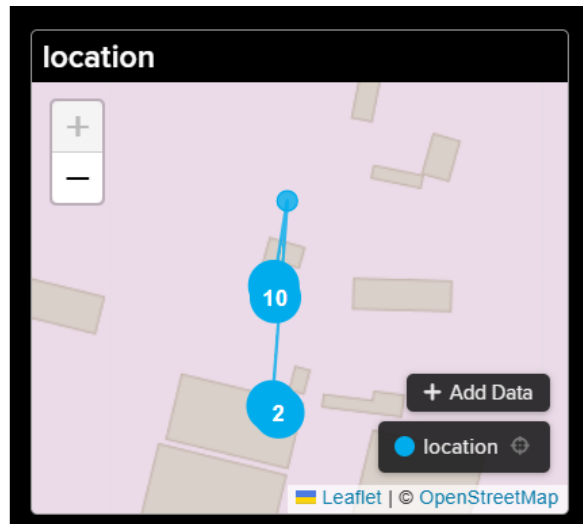


Figure IV. 15 : Trajet de marche d'un être humain

Le Graphique Linéaire Temporel (Line Chart) : Dédié à la température, il permet de valider le maintien des conditions de sécurité sur toute l'étendue de la chaîne logistique et de détecter les tendances de surchauffe.

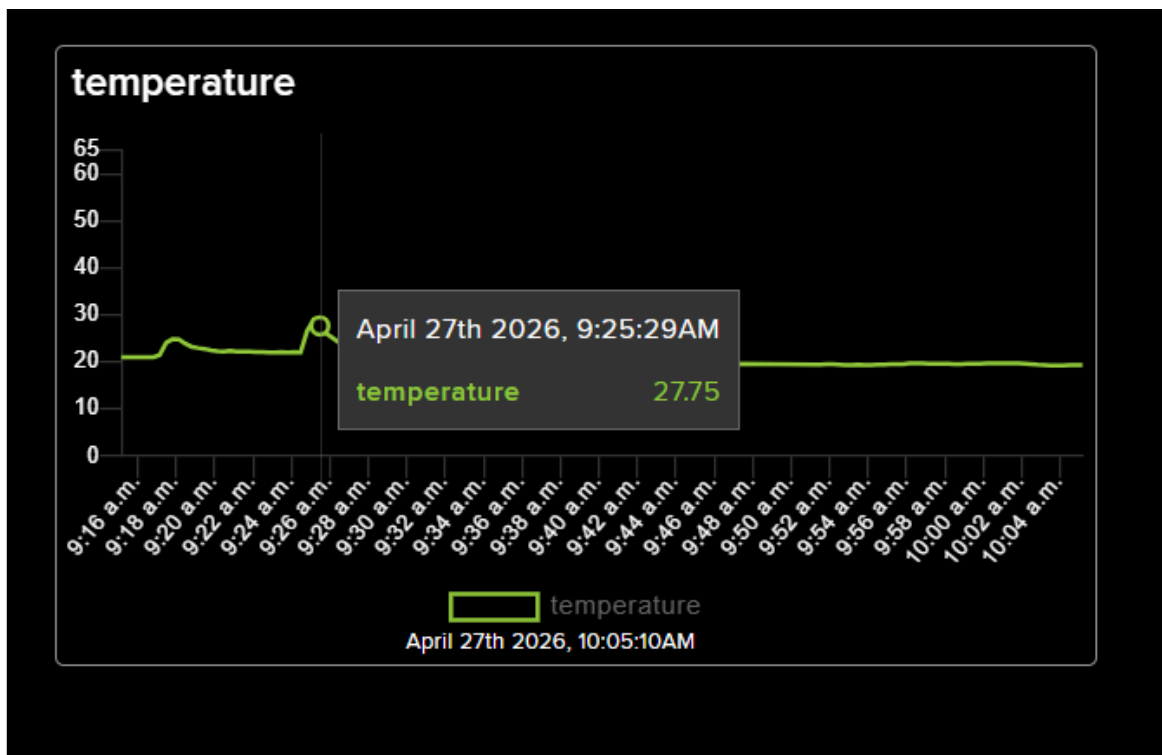


Figure IV. 16 : Affichage du la valeur de température par heure

La Jauge Instantanée (Gauge Widget) : Étalonnée de 0 à 1000, elle traduit instantanément l'amplitude de l'état vibratoire du véhicule, constituant un indicateur clé (KPI) de la qualité de la conduite et de l'état de la chaussée.

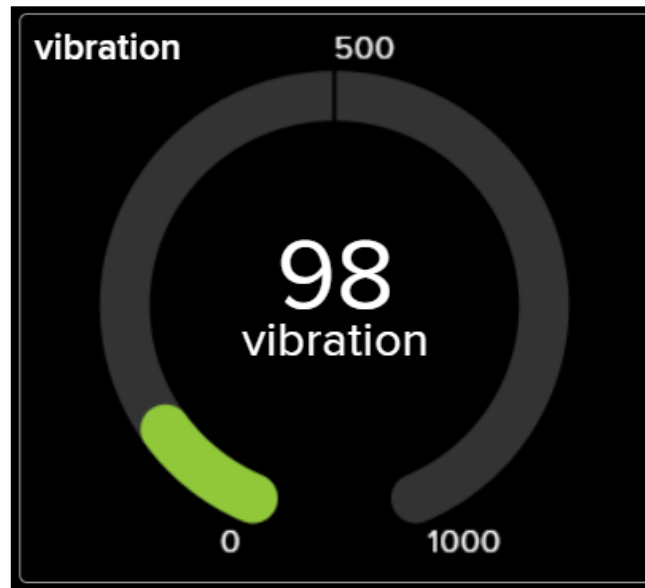


Figure IV. 17 : Affichage de l'intensité

Indicateur d'alerte (Indicator / Stream) sur le Feed Alertes : pour signaler visuellement tout franchissement de seuil et afficher l'historique des anomalies.

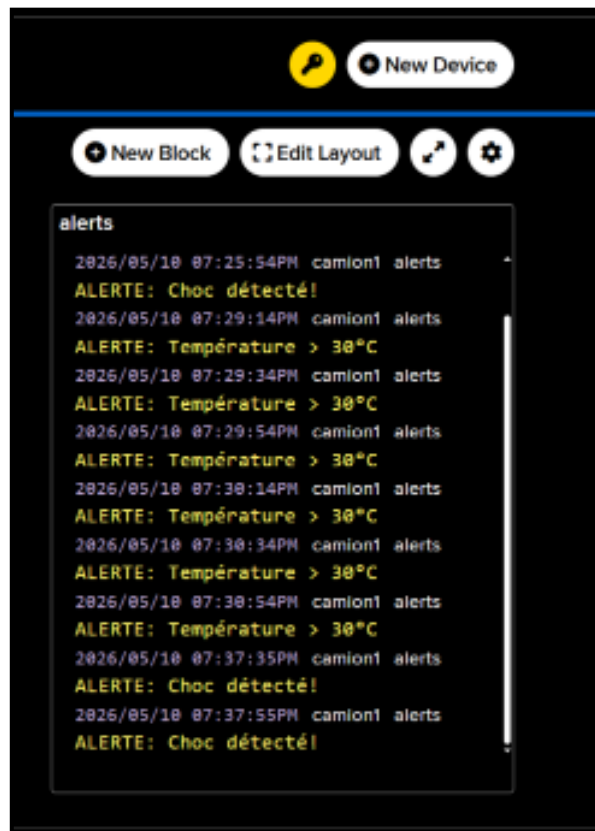


Figure IV. 18 : Affichage d'une alerte de température et une autre d'une vibration élevée

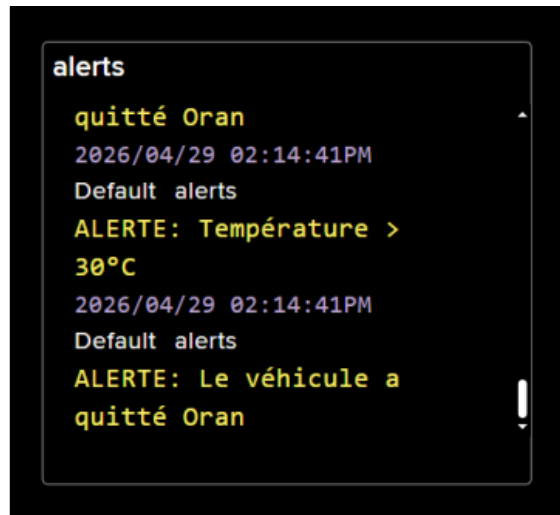


Figure IV. 19 : Alerte de la limite de zone

Indicateur de vitesse (Indicator / Stream) sur le Feed vitesse : pour indiquer la valeur de la vitesse par heure visuellement et afficher l'historique des anomalies.



Figure IV. 20 : La valeur de la vitesse sur le Dashboard de camion 1

IV.5. Résultats expérimentaux et validation énergétique

IV.5.1. Analyse des données collectées et précision

Les essais et simulations menés avec le prototype fonctionnel ont permis de valider la précision des capteurs et la stabilité de la chaîne de transmission :

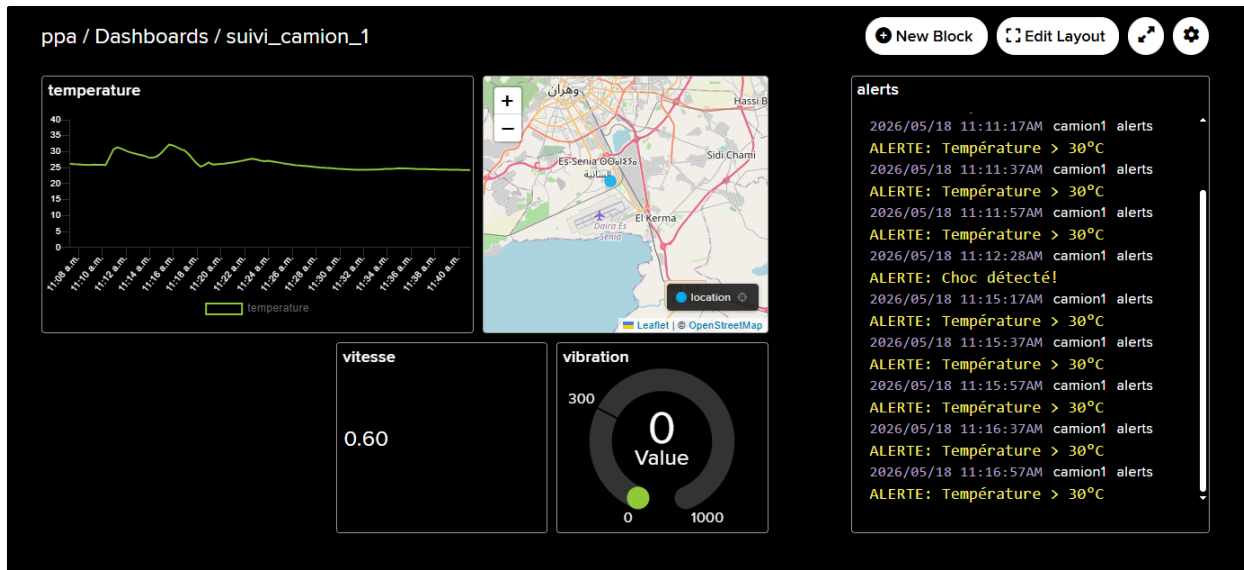


Figure IV. 21 : L'interface de contrôle développée sur Adafruit IO.

On y observe la convergence des données physiques et géographiques, permettant une traçabilité complète du véhicule 'camion1'.

- **Suivi Thermique** : Les relevés du capteur DS18B20 traduisent des mesures stables et cohérentes, sans fluctuations aberrantes, confirmant la fiabilité de la sonde numérique en milieu industriel.

Dès qu'une variation thermique est détectée, le capteur transforme instantanément cette grandeur physique en une donnée numérique via son convertisseur interne. Cette information est ensuite envoyée au microcontrôleur (ESP32) par le biais d'un fil unique, en utilisant le protocole de communication one-Wire

Le graphique de température montre l'évolution des valeurs mesurées pendant le trajet. Les données sont mises à jour automatiquement et enregistrées dans le feed (Température).

- **Précision Géographique** : Le tracé obtenu sur l'interface cartographique reproduit fidèlement l'itinéraire physique réel effectué lors des essais. La précision spatiale mesurée en zone dégagée oscille entre 3 et 5 mètres. Une latence technique mineure de 30 secondes est constatée, induite de manière incompressible par le temps d'acquisition des satellites (Time To First Fix) et le délai de publication réseau via les requêtes GPRS.

Les coordonnées du camion remontent directement dans le Feed(location) et s'affichent correctement sur la carte. Openstreetmap.la position du camion se met à jour automatiquement à peu près toutes les 30 secondes.

- **Détection des Chocs** : Le capteur de vibration répond instantanément aux sollicitations mécaniques. Les chocs brutaux et démarrages secs se traduisent fidèlement sur le tableau de bord par des pics d'amplitude significatifs (ex : valeur de 113 mesurée lors d'un impact) permettant une traçabilité totale des incidents de transport.

Le capteur SW-420 a permis de détecter les mouvements et vibration du camion. Une augmentation des valeurs a été observée lors du démarrage ou pendant les secousses.

Le module envoie alors un signal HIGH ou LOW vers le microcontrôleur (ESP32) pour indiquer la présence de vibration.

- **Détection des alertes :**

Lorsque le camion dévie de sa trajectoire (c'est-à-dire en dehors de la wilaya d'Oran), le relais coupe la pompe à essence, ce qui provoque l'arrêt progressif du véhicule. Dans notre exemple, nous avons utilisé un voyant vert pour représenter la pompe à essence.

Dès que la température augmente ou que les vibrations deviennent excessives, un voyant rouge se met à clignoter et un buzzer émet un signal sonore, indiquant que la température ou les vibrations ont dépassé le seuil maximal.

Le buzzer s'active dès qu'un courant électrique le traverse (dépassement du seuil maximal). Son comportement est binaire :

-Signal HIGH : Le buzzer se met à vibrer et émet un bip sonore.

-Signal LOW : Le courant est coupé, le composant redevient silencieux.

Dans tous les cas des alertes l'ESP32 envoie un message SMS au chauffeur pour lui informer s'il n'est pas au niveau de véhicule.

- ✓ **Observation générale**

Aucune fluctuation anormale n'a été observée, ce qui confirme la fiabilité du capteur dans le cadre de suivi de cargaison.

Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants.

Les points GPS qui s'affichent sur la carte collent vraiment bien au trajet que le camion a fait en vrai, avec une précision estimée entre 3 et 5 mètres dans les zones dégagées.

Une légère latence a été observée lors de la transmission des données GPS.

La mise à jour de la position d'effectue toutes les 30 secondes environ en raison du temps nécessaire à l'acquisition satellite et à l'envoi des données via le réseau.

Le capteur de vibration réagit pile comme il faut aux secousses et aux chocs. Les gros pics qu'on voit apparaître sur le tableau de bord correspondent exactement aux moments où le camion a bougé ou subi un impact pendant les tests.

Durant les essais, le système est resté stable dans la majorité des cas. Quelques retards mineurs ont été observés lorsque le signal réseau était faible.



Figure IV. 22 : SMS envoyé au chauffeur de 'camion 1'

IV.5.2. Tests du système d'alerte et de sécurité active

Les mécanismes d'alerte ont été testés en simulant délibérément chaque scénario d'anomalie prévu dans les spécifications fonctionnelles :

Tableau IV.2 : Test des scenarios

Scénario de test	Action attendue	Résultat obtenu	Statut
Acquisition température DS18B20	Transmission toutes les 20 s	Données reçues, précision $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	✓ Réussi
Détection vibration SW-420	Déclenchement ISR et publication Feed	Pics détectés lors des chocs simulés	✓ Réussi
Géolocalisation GPS	Coordonnées publiées toutes les 20 s	Précision 3–5 m en zone dégagée	✓ Réussi

Dépassement vitesse > 80 km/h	Triple alerte + SMS	Déclenchée en < 1 s	✓ Réussi
Dépassement température > 30°C	Triple alerte + SMS	SMS reçu en < 5 s	✓ Réussi
Choc majeur (SW-420)	Alerte locale + SMS chauffeur	Alerte reçue sur Dashboard < 2 s	✓ Réussi
Sortie zone géographique (Wilaya d'Oran)	Coupure motrice + SMS géo-violation	Coupure effective, SMS transmis	✓ Réussi
Anti-spam SMS (flag smsSent)	Un seul SMS par événement	Aucun doublon détecté	✓ Réussi
Stabilité connexion MQTT (4G)	Maintien connexion sur toute la durée	Taux de succès ~95 %	✓ Réussi

Le taux de succès global d'envoi et de réception des paquets de données télémétriques est estimé à **95%** sur l'ensemble des cycles de test. Les 5% de perte constatés correspondent à des zones d'ombres localisées où l'atténuation du signal de l'opérateur télécom cellulaire ralentit momentanément la connectivité, sans pour autant altérer la stabilité générale du micrologiciel de l'ESP32.

IV.5.3. Validation des objectifs métiers et techniques

Afin de sanctionner la réussite du projet de fin d'études, une matrice de tests unitaires et de validation des objectifs a été dressée au terme des essais expérimentaux :

Tableau IV.3 : Validation des objectifs techniques

Objectif Technologique Stratégique	Indicateur Opérationnel Constaté	Statut Final
Acquisition des coordonnées GPS	Capture et extraction des trames satellites de positionnement	Atteint
Transmission des données vers Adafruit IO	Tunnel de communication MQTT stable sur réseau cellulaire 4G GPRS	Atteint

Affichage en temps réel sur Dashboard	Rafraîchissement des widgets cartographiques, jauges et graphiques	Atteint
Détection instantanée des vibrations	Capture des chocs par interruption matérielle en tâche de fond	Atteint
Mesure et transmission de la température	Monitoring thermique continu et précis via protocole One-Wire	Atteint
Stabilité globale du système d'alertes	Exécution de la triple sécurité (Coupure relais + LED/Buzzer + SMS)	Fonctionnel

On atteint les gros objectifs du projet. Le système fait le job, il surveille le camion en temps réel en envoyant toutes les données des capteurs directement sur une interface Cloud ce qui permet de tout checker à distance sans problème.

Comparaison entre la situation avant et après la mise en place du système de traçabilité GPS

IV.6. Comparaison avec le système classique

Avant qu'on installe ce système, le suivi des transports, c'était un peu de la navigation à vue. Les coordonnateurs logistiques n'avaient aucun moyen de localiser les camions en temps réel. Pour savoir où se trouvait un camion, nous étions réduits à devoir appeler le chauffeur directement au téléphone.

En cas de retard, d'incident ou de changement d'itinéraire pendant le transport, nous subissons un véritable décalage dans la réception de l'information.

Cette situation pouvait entraîner des difficultés dans la gestion des livraisons, une augmentation du temps de réaction face aux problèmes et une diminution de la qualité du service offert aux clients.

- Grâce à l'intégration d'un système de géolocalisation GPS, nos coordinateurs ont désormais une visibilité parfaite sur la flotte en temps réel depuis leur écran. Connaître la position exacte de nos camions à chaque instant nous offre une visibilité totale et inédite sur toutes nos opérations de transport.

Ce système permet également de détecter immédiatement les arrêts non prévus, les retards ou les écarts par rapport à l'itinéraire défini. Toutes les informations sont transmises automatiquement, ce qui facilite la prise de décision et améliore la réactivité des gestionnaires.

IV.7. Conclusion

En conclusion, ce quatrième chapitre a permis de valider le passage du modèle théorique à un prototype fonctionnel et communicant de niveau industriel. L'association de l'intelligence embarquée de l'ESP32 et de la flexibilité du protocole MQTT sur le Cloud Adafruit IO offre une solution de supervision robuste, capable d'éliminer les zones d'ombre logistiques et de sécuriser activement le transport de flux critiques. Les objectifs initiaux du cahier des charges sont pleinement validés par l'expérimentation. Bien que la non-disponibilité locale de certains capteurs spécifiques (pression et fuite de gaz) ait limité le périmètre matériel initial, leur intégration logicielle est déjà prévue dans l'architecture du Firmware, constituant ainsi une perspective d'évolution directe pour une industrialisation future du système.

Conclusion générale et perspectives

Ce système permet d'assurer une traçabilité et de la visibilité en temps réel, adaptée aux exigences industrielles du complexe gazier GP1Z de Sonatrach. Pour surmonter les limites des méthodes classiques, une solution IOT reposant sur la carte esp32 TTGO SIM7600 et des capteurs a été développée et a montré des résultats satisfaisants. Grâce au cloud adafruit IO et au protocole MQTT, les données collectées sur le terrain ont été transformées en un tableau de bord décisionnel instantané.

Les tests réalisés ont confirmé la fiabilité du prototype, avec un taux de réussite de 95%. Ils ont également démontré la réactivité du dispositif de sécurité active lors de scénarios critiques, garantissant une meilleure surveillance des ressources et du personnel.

En conclusion, Le système développé a permis d'atteindre les objectifs fixés en offrant une solution fiable, connectée et adaptée aux besoins de la surveillance et la gestion des opérations logistiques en temps réel. Cette approche ouvre également de perspectives d'amélioration et d'extension vers d'autres applications industrielles basées sur l'Internet des Objets.

Les résultats obtenus dans ce mémoire permettent d'envisager plusieurs perspectives et pistes d'amélioration pour approfondir les recherches dans ce domaine.

1. Optimisation énergétique et autonomie : Configurer l'ESP32 et le SIM7600 en mode de veille profonde lorsque le camion est à l'arrêt complet (détecté par le SW-420), et ne les réveiller que par interruption matérielle en cas de mouvement. Cela prolongerait considérablement la durée de vie de la batterie. (À étudier)

2. Améliorations matérielles (Hardware) et sécurité : Conception d'un PCB industriel et boîtier robuste : Passer du montage sur carte de prototypage à la conception d'un circuit imprimé (PCB) dédié et compact, protégé dans un boîtier étanche (norme IP67) pour résister aux vibrations mécaniques et aux conditions thermiques rudes du moteur d'un camion.

3. Évolution logicielle et intelligence des données : Pour la suite, intégration d'un fog computing directement dans les systèmes embarqués des camions. Un nœud Fog embarqué permettrait de traiter les données localement et rapidement et filtrer les informations inutiles et réduire le volume des données envoyées au cloud. Cela permet de réduire les informations répétitives. Par exemple, en cas d'immobilisation du camion, l'envoi des coordonnées toutes les 30 secondes est suspendu, et une alerte de mise à l'arrêt nous est envoyée.

Transition vers une plateforme Cloud propriétaire et IA : Remplacer Adafruit IO qui est une plateforme de prototypage par une application web/mobile dédiée développée sur mesure. On pourrait intégrer une intelligence artificielle dans la plateforme Cloud pour analyser automatiquement les données des camions et détecter les anomalies, prévoit les pannes. Cela aide l'entreprise à intervenir plus rapidement et réduire les arrêts imprévus.

Références bibliographiques

- [1] M. Christopher, *Logistics and Supply Chain Management : Logistics & Supply Chain Management*. Pearson UK, 2016.
- [2] M. Ben-Daya, E. Hassini, et Z. Bahroun, « Internet of things and supply chain management: a literature review », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, n° 15-16, p. 4719-4742, août 2019, doi: 10.1080/00207543.2017.1402140.
- [3] « The DHL Logistics Trend Radar 7.0 ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dhl.com/discover/en-global/news-and-insights/reports-and-press-releases/logistics-trend-radar-2024>
- [4] F. Mohammed, « Système de Traçabilité dans la Chaîne Logistique Globale », Université Oran1, 2025. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-oran1.dz/handle/123456789/4581>
- [5] « LA LOGISTIQUE AU SERVICE DE L'ENTREPRISE : MOYENS, MECANISMES ET ENJEUX by TIXIER DANIEL / MATHE HERVE / COLIN JACQUES: bon Couverture souple (1983) | Le-Livre ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.abebooks.com/LOGISTIQUE-SERVICE-LENTREPRISE-MOYENS-MECANISMES-ENJEUX/30083923653/bd>
- [6] R. Varadarajan, « Strategic marketing and marketing strategy: domain, definition, fundamental issues and foundational premises », *J. Acad. Mark. Sci.*, vol. 38, n° 2, p. 119-140, avr. 2010, doi: 10.1007/s11747-009-0176-7.
- [7] kls-group-admin, « Chaîne logistique : définition et explications », KLS-group. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kls-group.fr/gestion-de-la-chaine-logistique-definition-explications/>
- [8] « Quels sont les différents types de flux de la Supply Chain ? », SupplyChainInfo. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.supplychaininfo.eu/faq/quels-differents-types-flux-supply-chain/>
- [9] F. Pradal, « Supply Chain: Our guide », Clever Age. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.clever-age.com/en/supply-chain-our-guide/>
- [10] « Qu'est-ce que la gestion de la Supply Chain (SCM) ? | SAP ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sap.com/france/resources/what-is-supply-chain-management>
- [11] S. Chopra, *Supply chain management: strategy, planning, and operation*, Seventh edition. New York, NY: Pearson, 2019.
- [12] « L'impact de la transformation numérique sur les achats de la chaîne d'approvisionnement pour créer un avantage concurrentiel : une étude empirique »,

ResearchGate. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur:

https://www.researchgate.net/publication/363854942_The_Impact_of_Digital_Transformation_on_Supply_Chain_Procurement_for_Creating_Competitive_Advantage_An_Empirical_Study

[13] J. Industrie, « Pourquoi la supply chain est devenue plus fragile ? », *job-industrie.com*. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://job-industrie.com/articles-divers-industrie/pourquoi-supply-chain-plus-fragile/>

[14] P. Nguyen et D. Ivanov, « Decomposing Supply Chain Complexity: A Multilayer Network Perspective », *IFAC-Pap.*, vol. 59, n° 24, p. 13-18, janv. 2025, doi: 10.1016/j.ifacol.2025.11.833.

[15] T. Scott, « What Is Supply Chain Visibility and Why Is It Important? », *Enterprise Master Data Management • Profisee*. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://profisee.com/blog/supply-chain-visibility/>

[16] N. Fabbe-Costes et C. Lemaire, « La traçabilité totale d'une supply chain : principes, obstacles et perspectives de mise en oeuvre », *Rev. Fr. Gest. Ind.*, vol. Vol.20, n° N°3, p. pp.23-52., 2001.

[17] « Les Outils Dans L'Activité Collective Médiatisée en Conception : Traçabilité des Usages au Sein du Processus de Conception Architecturale - ProQuest ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.proquest.com/openview/81aac65f28965c4b211cbd0515a1febd/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

[18] Mecalux, « Les différents types de traçabilité en logistique avec exemples à l'appui ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mecalux.fr/blog/types-tracabilite>

[19] « SSCC : le code d'identification unique des colis et palettes | GS1 ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.fr/sscc-standard-international-didentification-colis-palettes>

[20] « 50 ans de GS1 : notre rétrospective | GS1 ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.fr/50-ans-transformer-demain/50-ans-gs1-notre-retrospective>

[21] « History of QR Code | QRcode.com | DENSO WAVE ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.qrcode.com/en/history/>

[22] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, et M. Ayyash, « Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 17, n° 4, p. 2347-2376, 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.

- [23] K. Finkenzeller, « RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Third Edition ».
- [24] E. D. Kaplan et C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition*. Artech House, 2017.
- [25] N. Kryvinska et M. Greguš, Éd., *Developments in Information & Knowledge Management for Business Applications: Volume 4*, vol. 420. in *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 420. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-95813-8.
- [26] « Information Technology for Management: Driving Digital Transformation to Increase Local and Global Performance, Growth and Sustainability, 12th Edition | Wiley », Wiley.com. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wiley.com/en-us/Information+Technology+for+Management%3A+Driving+Digital+Transformation+to+Increase+Local+and+Global+Performance%2C+Growth+and+Sustainability%2C+12th+Edition-p-9781119702900>
- [27] « Interopérabilité logistique et performance supply chain | Sinari ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sinari.com/blog/interoperabilite-logistique>
- [28] postDICOM, « L'interopérabilité dans DICOM : Naviguer parmi les défis d'une communication système fluide », postDICOM. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.postdicom.com/fr/blog/navigating-the-challenges-of-seamless-system-communication>
- [29] « <https://flexlogistics.eu/7-critical-data-governance-challenges-in-end-to-end-supply-chains/> - Recherche Google ». Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/search?q=https://flexlogistics.eu/7-critical-data-governance-challenges-in-end-to-end-supply-chains/&authuser=1>
- [30] M. Dane, « Supply Chain Visibility: Challenges & Solutions for Success | Millennial », Millennial Magazine. Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://millennialmagazine.com/2025/03/27/supply-chain-visibility/>
- [31] L. Atzori, A. Iera, et G. Morabito, « The Internet of Things: A survey », *Comput. Netw.*, vol. 54, n° 15, p. 2787-2805, oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [32] W. H. Dutton, « Putting things to work: social and policy challenges for the Internet of things », *Info*, vol. 16, n° 3, p. 1-21, mai 2014, doi: 10.1108/info-09-2013-0047.
- [33] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, et M. Palaniswami, « Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions », *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, n° 7, p. 1645-1660, sept. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [34] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, et L. Xu, « Edge Computing: Vision and Challenges », *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, n° 5, p. 637-646, oct. 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2579198.

- [35] N. Subramanian et M. D. Abdulrahman, « Logistics and cloud computing service providers' cooperation: a resilience perspective », *Prod. Plan. Control*, vol. 28, n° 11-12, p. 919-928, sept. 2017, doi: 10.1080/09537287.2017.1336793.
- [36] D. Ivanov, A. Dolgui, et B. Sokolov, « The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, n° 3, p. 829-846, févr. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1488086.
- [37] P. Mell et T. Grance, « The NIST Definition of Cloud Computing ».
- [38] D. M. Kückelhaus, J. Macaulay, G. Chung, et L. Buckalew, « Represented by Matthias Heutger Senior Vice President DHL Customer Solutions & Innovation 53844 Troisdorf, Germany ».
- [39] G. Wang, A. Gunasekaran, E. W. T. Ngai, et T. Papadopoulos, « Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications », *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 176, p. 98-110, juin 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.03.014.
- [40] « Fog Computing: principles, architectures, and applications », in *Internet of Things*, Morgan Kaufmann, 2016, p. 61-75. doi: 10.1016/B978-0-12-805395-9.00004-6.
- [41] R. K. Naha *et al.*, « Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions », *IEEE Access*, vol. 6, p. 47980-48009, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866491.
- [42] S. Yi, C. Li, et Q. Li, « A Survey of Fog Computing: Concepts, Applications and Issues », in *Proceedings of the 2015 Workshop on Mobile Big Data*, in Mobidata '15. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, juin 2015, p. 37-42. doi: 10.1145/2757384.2757397.
- [43] « Fog Computing: principles, architectures, and applications », in *Internet of Things*, Morgan Kaufmann, 2016, p. 61-75. doi: 10.1016/B978-0-12-805395-9.00004-6.
- [44] « Fog computing : définition et explications », ionos Digital Guide. Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/fog-computing/>
- [45] M. A. Waller et S. E. Fawcett, « Data Science, Predictive Analytics, and Big Data: A Revolution That Will Transform Supply Chain Design and Management », *J. Bus. Logist.*, vol. 34, n° 2, p. 77-84, 2013, doi: 10.1111/jbl.12010.
- [46] « Artificial intelligence in supply chain management: theory and applications: International Journal of Logistics Research and Applications: Vol 13, No 1 ». Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13675560902736537>

- [47] B. Montreuil, « Toward a Physical Internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge », *Logist. Res.*, vol. 3, n° 2, p. 71-87, mai 2011, doi: 10.1007/s12159-011-0045-x.
- [48] S. Pan, E. Ballot, G. Q. Huang, et B. Montreuil, « Physical Internet and interconnected logistics services: research and applications », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, n° 9, p. 2603-2609, mai 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1302620.
- [49] « Physical internet », imec. Consulté le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.imec-int.com/en/articles/physical-internet-next-gen-vision-logistics>
- [50] « T-SIM7600E/G/SA-H », LILYGO®. Consulté le: 6 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://lilygo.cc/en-us/products/t-sim7600>
- [51] « SW-420 Vibration Sensor Module », Components101. Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://components101.com/sensors/sw-420-vibration-sensor-module>
- [52] « DollaTek SW-420 NC Type Vibration Sensor Module User Manual », Manuals.plus. Consulté le: 6 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://manuals.plus/asin/B07DJ5NVSC>
- [53] « Core Technologies DC 3-24V Industrial Continuous Sound Electronic Buzzer Black : Amazon.ae: Tools & Home Improvement ». Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.amazon.ae/Core-Technologies-Industrial-Continuous-Electronic/dp/B00NYCEMZA>
- [54] « Active Passive Buzzer », Components101. Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://components101.com/misc/buzzer-pinout-working-datasheet>
- [55] W. Storr, « Relay Switch Circuit and Relay Switching Circuit », Basic Electronics Tutorials. Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electronicstutorials.ws/blog/relay-switch-circuit.html>
- [56] « sourcing map 100pcs 2 Colors x 50pcs 5mm Red Green LED Diode Lights Colored Lens Diffused Round 20mA Lighting Bulb Lamp Electronic Components Light Emitting Diodes : Amazon.co.uk: Business, Industry & Science ». Consulté le: 16 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.amazon.co.uk/Sourcingmap-Diffused-Lighting-Electronic-Components/dp/B07G3TM4MS>
- [57] « Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) | Arduino Documentation ». Consulté le: 6 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/uart/>