

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**  
**Scientifique**

**UNIVERSITÉ 20 AOUT 1955 DE SKIKDA**



**Faculté des sciences**  
**Département d'Informatique**

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention**  
**du diplôme de Master Académique en Informatique**

**Option :**

**Génie Logiciel Avancé et Applications**

**Thème :**

---

**Développement d'un système IOT pour la surveillance et**  
**l'optimisation énergétique d'un Four Industriel**

---

**Réalisé par :**

- **GUENNOUNE Med.Amine**
- **RAHMOUNI Hidaya**

**Dirigé par :**

**Dr. KISSOUM Yacine**

**Année Universitaire 2024/2025**

# *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord Le Bon Dieu de nous avoir accordé la santé, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nous exprimons ensuite notre profonde gratitude à Dr. KISSOUM Yacine, notre encadreur et, pour son accompagnement constant, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce projet. Son encadrement rigoureux et sa confiance ont largement contribué à la réussite de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département d'informatique, qui nous ont transmis leur savoir et nous ont soutenus tout au long de notre parcours académique.*

*Nous remercions aussi toutes les personnes, collègues, camarades et amis, qui nous ont encouragés, aidés ou soutenus de près ou de loin dans l'accomplissement de ce projet.*

*Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience durant toutes les étapes de notre formation. Leur confiance a été une source inestimable de motivation.*

# *Dédicace 1*

*Je dédie ce travail :*

*À la mémoire de mon père,  
dont l'amour, les conseils et la force continuent de  
m'accompagner chaque jour.  
Ce mémoire est aussi le fruit de tout ce qu'il m'a transmis.*

*À ma mère,  
pour son soutien inconditionnel, sa patience et ses sacrifices  
sans limites.*

*À ma famille,  
pour leur présence rassurante, leurs encouragements et leur  
compréhension.*

*À mes amis,  
pour leur aide, leur bonne humeur et leur soutien tout au long  
de ce parcours.*

*À mes enseignants,  
pour leur accompagnement, leurs conseils et leur disponibilité.*

*À toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à  
la réalisation de ce mémoire,  
je vous adresse ma sincère gratitude.*

*Hidaya*

## *Dédicace 2*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers.*

*À ma mère,*

*ma lumière, mon pilier, ma force tranquille. Femme exceptionnelle qui n'a jamais reculé devant aucun sacrifice pour me voir avancer.*

*Merci pour ton amour sans condition, ta patience infinie, ton écoute, ton courage et ta présence constante, même dans mes silences.*

*À mon père,*

*parti trop tôt, mais dont la présence continue d'habiter chaque moment de ma vie. Ton amour, tes conseils et ta force sont gravés en moi. Tu m'as appris à être fort, à persévérer, à croire en mes rêves. Ce travail, je le réalise aussi pour toi, en mémoire de tout ce que tu m'as transmis.*

*À mes sœur Sara et Rania,*

*merci pour votre tendresse, vos encouragements, votre complicité et votre amour. Vous m'êtes précieux. Que Dieu vous protège et vous accorde une vie pleine de joie et de réussite.*

*À mes grands-parents, mes tantes et mes oncles,*

*pour leur amour, leurs prières et leur soutien tout au long de mon parcours. Merci pour votre présence rassurante.*

*À mes chères amies,*

*celles qui ont croisé mon chemin et qui ont su, chacune à sa manière, égayer mon quotidien et m'apporter leur soutien. Merci pour les souvenirs, les fous rires et votre sincère amitié.*

*Amine*

## ***Résumé***

La conception et le développement d'un système IoT intégré à un environnement industriel, destiné à surveiller en temps réel un four industriel. L'objectif est de détecter les anomalies de fonctionnement, de proposer des optimisations et d'améliorer l'efficacité énergétique du four. Le système repose sur des capteurs intelligents pour collecter les données, le Cloud Computing et le Fog Computing pour le traitement distribué, et l'intelligence artificielle pour analyser les données et générer des recommandations. Une modélisation UML est utilisée pour formaliser les interactions entre les différents acteurs (opérateur, technicien) et composants (capteurs, four, module d'optimisation). La contribution principale consiste en la proposition d'un prototype fonctionnel capable d'alerter sur des dysfonctionnements, de recommander des actions préventives et d'optimiser la consommation d'énergie. Les résultats attendus incluent une maintenance prédictive renforcée, des économies d'énergie significatives et une fiabilité accrue des opérations du four. Ce travail illustre également les apports de l'Industrie 4.0 et des technologies numériques pour rendre les installations de production plus intelligentes et plus économes en énergie.

**Mot clés :** Iot ; Industrie 4.0 ; Four Industriel ;

## ***Abstract***

The design and development of an IoT system integrated into an industrial environment, intended to monitor an industrial furnace in real time. The objective is to detect operational anomalies, propose optimizations, and improve the energy efficiency of the furnace. The system relies on smart sensors to collect data, cloud computing and fog computing for distributed processing, and artificial intelligence to analyze the data and generate recommendations. UML modeling is used to formalize the interactions between different actors (operator, technician) and components (sensors, furnace, optimization module). The main contribution is the proposal of a functional prototype capable of alerting about malfunctions, recommending preventive actions, and optimizing energy consumption. The expected outcomes include enhanced predictive maintenance, significant energy savings, and increased operational reliability of the furnace. This work also illustrates the contributions of Industry 4.0 and digital technologies in making production facilities smarter and more energy-efficient.

**Keywords :** Iot ; Industrie 4.0 ; Four Industriel

## **Liste d'abréviations**

**IOT** : Internet Of Things

**IA** : Intelligence Artificielle

**TIC** : Technologie de L'information et de la Communication

**RFID** : Radio Frequency Identification

**UML** : Unified Modeling Language

# Sommaire

Introduction générale :.....	8
<b>Chapitre 1 : Internet des Objets (IoT)</b>	
1.1 Introduction :.....	11
1.2 Définition de l'IOT :.....	11
1.3 Historique de l'IOT:.....	12
1.4 Fonctionnement de l'IOT : .....	13
1.5 La structure d'un système de l'IOT : .....	15
1.6 Internet industrielle des objets « Industrial Internet of Things »: .....	16
1.7 Cloud Computing :.....	17
1.7.1 Modèles de service du Cloud Computing :.....	18
1.7.2 Modèles de déploiement : .....	20
1.7.3 Caractéristiques du Cloud Computing :.....	22
1.8 Fog Computing: .....	24
1.8.1 Déploiement du Fog Computing:.....	24
1.8.2 Comment fonctionne le Fog Computing:.....	25
1.8.3 Avantages du Fog Computing:.....	26
1.9 Conclusion :.....	26
<b>Chapitre 2 : L'industrie 4.0</b>	
2.1 Introduction :.....	28
2.2 Définition de l'industrie 4.0: .....	28
2.3 Pourquoi l'industrie 4.0: .....	28
2.4 Facteur humain dans l'industrie 4.0: .....	30
2.5 Technologies fondamentales de l'industrie 4.0 : .....	31
2.6 Avantages de l'industrie 4.0 appliqués à un système IoT pour four industriel :.....	33
2.7 Domaines d'application de l'industrie 4.0 : .....	33
2.7.1 La santé : .....	34
2.7.2 Industrie du pétrole et du gaz : .....	36
2.7.3 Bureau intelligent (Smart Office):.....	36
2.7.4 Logistique et Internet industriel : .....	36
2.7.5 Smart home : .....	37
2.8 L'IoT et l'optimisation énergétique dans le contexte de l'Industrie 4.0 : .....	38
2.9 Conclusion :.....	39

### **Chapitre 3 : Modélisation et conception**

3.1	Introduction :.....	41
3.2	Langage de conception UML : .....	41
3.3	Les diagrammes UML utilisés : .....	41
3.4	Exigence fonctionnelle : .....	42
3.4.1	Diagramme de contexte .....	42
3.4.2	Diagramme de cas d'utilisation : .....	43
3.4.3	Identification des acteurs : .....	44
3.4.4	Identification des cas d'utilisation : .....	44
3.4.5	Relations entre cas d'utilisation : .....	45
3.4.6	Diagramme de classe : .....	46
3.4.7	Diagramme de Séquence : .....	48
3.4.8	Description détaillée des scénarios : .....	48
3.4.9	Diagramme d'activité : .....	50
3.5	Conclusion : .....	51

### **Chapitre 4 : Prototypage et Implémentation..... 53**

4.1	Introduction .....	54
4.2	Étude de l'existant : .....	54
4.3	Application de la conception : .....	56
4.4	Prototypage et implémentation : .....	57
4.5	Modélisation d'un prototype du four 4.0 : .....	58
4.6	Environnements de développement : .....	63
4.6.1	Plateformes : .....	63
4.6.2	Equipements utilisés : .....	65
4.7	Conclusion.....	67
	Conclusion Générale .....	68
	Références.....	69

## Liste des figures :

Figure 1 : Internet des objets .....	11
Figure 2 : L'évolution de l'IOT .....	13
Figure 3 : Fonctionnement de l'IOT .....	13
Figure 4 : La structure d'un système IOT .....	15
Figure 5 : L'IOT et l'industrie 4.0 .....	17
Figure 6 : Cloud Computing.....	18
Figure 7 : Modèles de service du Cloud Computing .....	19
Figure 8 : Modèle de déploiement Cloud.....	20
Figure 9 : Modèle de déploiement hybride .....	21
Figure 10 : Modèle de déploiement sur site .....	22
Figure 11 : Caractéristiques du Clou Computing .....	23
Figure 12 : L'évolution industrielle.....	30
Figure 13 : L'homme et l'industrie 4.0 .....	31
Figure 14 : Les composants de l'industrie 4.0 .....	31
Figure 15 : Santé 4.0 .....	35
Figure 16 : Logistique 4.0 .....	37
Figure 17 : Maison intelligente.....	38
Figure 18 : Diagramme de contexte.....	42
Figure 19 : Diagramme de cas d'utilisation .....	43
Figure 20 : Diagramme de classe.....	46
Figure 21 : Diagramme de séquence.....	48
Figure 22 : Diagramme d'activité .....	50
Figure 23 : Four industriel de recuit de l'entreprise ENMTP .....	55
Figure 24 : Prototype du four 4.0.....	58
Figure 25 : Interface de l'application .....	59
Figure 26 : Notification alerte .....	60
Figure 27 : Un individu a été détecté.....	61
Figure 28 : La porte du four s'ouvre .....	62
Figure 29 : Notification d'ouverture de la porte .....	62
Figure 30 : Ouverture et fermeture manuelle .....	62
Figure 31 : Notification de fermeture .....	63
Figure 32 : Fermeture automatique de la porte.....	63
Figure 33 : Langage C++ .....	64
Figure 34 : Arduino .....	64
Figure 35 : Blynk .....	64

Figure 36 : Arduino NodeMCU .....	65
Figure 37 : Servo Moteur .....	65
Figure 38 : Capteur Ultrasonique .....	66
Figure 39 : Capteur de température .....	66
Figure 40 : LED .....	66
Figure 41 : Buzzer.....	67

*Liste des tableaux :*

Tableau 1 : Fonctionnement du Fog Computing .....	25
Tableau 2 : L'évolution de la santé numérique .....	35

## Introduction générale :

Dans un monde en constante évolution, marqué par une accélération des avancées technologiques, l'optimisation des processus industriels est devenue une priorité stratégique pour les entreprises. L'émergence de l'Internet des Objets (IoT), associée à la transition vers l'Industrie 4.0, ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de la surveillance et de la gestion énergétique. Ces technologies permettent aujourd'hui de concevoir des systèmes intelligents capables de collecter, analyser et exploiter les données en temps réel pour améliorer les performances, réduire les coûts et limiter l'impact environnemental.

Dans ce contexte, le secteur industriel se voit profondément transformé par l'intégration de capteurs connectés, de plateformes de traitement décentralisées (Fog et Cloud Computing) et d'interfaces de supervision. L'objectif est de mettre en place des solutions intelligentes, flexibles et évolutives qui répondent aux exigences de compétitivité et de durabilité.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique technologique. Il vise à concevoir et à simuler un système IoT dédié à la surveillance et à l'optimisation énergétique d'un four industriel, en combinant des capteurs intelligents, une carte de contrôle Arduino, et une interface de visualisation. Cette démarche repose sur une approche à la fois théorique et pratique, couvrant la modélisation du système, le choix des composants, le développement du code embarqué et l'évaluation des performances du dispositif.

Ce travail s'adresse ainsi à la fois aux chercheurs, aux ingénieurs et aux professionnels du secteur, dans une perspective de modernisation continue des systèmes industriels. Il met en lumière les possibilités offertes par les technologies intelligentes, tout en ouvrant la voie à de futures améliorations que d'autres pourront explorer, notamment en matière de maintenance prédictive, d'intelligence artificielle embarquée ou de cybersécurité des systèmes industriels.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

### **Chapitre 1 : Internet des Objets (IoT)**

Ce chapitre présente les fondements de l'IoT, ses architectures, ses technologies clés (capteurs, communication, Cloud/Fog Computing) et ses apports dans le contexte industriel.

### **Chapitre 2 : Industrie 4.0**

Ce chapitre explore la quatrième révolution industrielle, ses technologies structurantes (IA, Big Data, Cybersécurité) et les gains attendus en productivité, sécurité et efficacité énergétique.

### **Chapitre 3 : Modélisation UML du système**

Ce chapitre décrit la conception du système IoT à l'aide de diagrammes UML (cas d'utilisation, classes, séquences, activités), illustrant les interactions entre acteurs, capteurs et modules intelligents.

### **Chapitre 4 : Prototypage et Implémentation**

Ce chapitre détaille l'implémentation technique du système, le choix des composants matériels (capteurs, NodeMCU, etc.)

# **Chapitre 1 : Internet des Objets (IoT)**

## 1.1 Introduction :

L'internet des objets (IoT) transforme radicalement l'industrie en mettant en place des systèmes intelligents qui ont la capacité de contrôler, d'automatiser et d'améliorer les processus de production. L'IoT, en reliant des machines, capteurs et équipements à un réseau digital, facilite la récolte de données instantanées, l'entretien prévisionnel, la diminution des dépenses et le perfectionnement constant des rendements. Ce chapitre explore la manière dont l'IoT, associée au Cloud Computing, au Fog Computing et aux capteurs sans fil, révolutionne le secteur en le faisant évoluer vers un modèle plus intelligent, plus réactif et plus compétitif.

## 1.2 Définition de l'IOT :

En général, l'Internet des Objets englobe tous les objets susceptibles d'être reliés à un réseau Internet. De nos jours, l'IoT fait surtout référence aux objets connectés dotés de capteurs, de programmes informatiques et d'autres technologies leur permettant d'échanger des données entre eux pour des objectifs d'information ou d'automatisation. Dans le passé, la connexion se faisait principalement via le Wi-Fi. Actuellement, avec l'avènement de la 5G et d'autres formes de plates-formes en réseau, il est désormais possible de gérer d'énormes quantités de données presque partout de façon rapide et fiable. La figure (1) ci-jointe illustre cela :

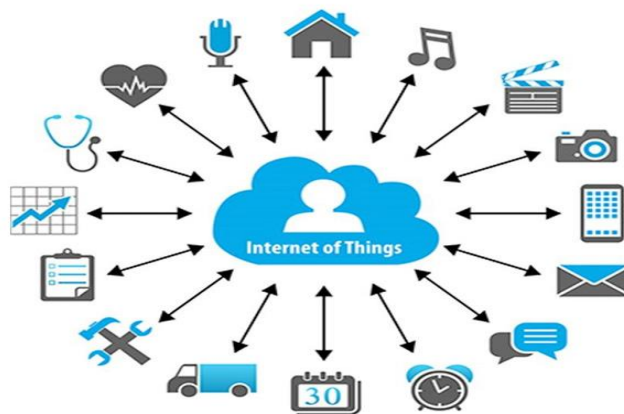


Figure 1 : Internet des objets

Après que les dispositifs IoT ont recueilli et communiqué les données, le but est d'en exploiter au maximum l'information et d'en dégager des conclusions et des perspectives toujours plus précises et raffinées. C'est à ce stade que les technologies d'intelligence artificielle (IA) prennent le relais : à travers l'analytique avancée et le Machine Learning, elles amplifient les réseaux IoT [1].

### 1.3 Historique de l'IOT:

L'Internet des Objets (IoT) désigne un réseau d'objets physiques connectés à Internet, capables de collecter et d'échanger des données. Son évolution s'étend sur plusieurs décennies, jalonnée par des avancées technologiques significatives [2].

- **Années 1970-1980** : Les premières bases de l'IoT sont posées avec le développement des réseaux sans fil et des réseaux cellulaires commerciaux, ouvrant la voie à la transmission de données sans fil.
- **1982** : Des étudiants de l'Université Carnegie Mellon connectent un distributeur de sodas au réseau ARPANET, permettant de vérifier l'état des boissons à distance. Cet appareil est considéré comme le premier dispositif IoT.
- **1990** : John Romkey présente un grille-pain contrôlé via Internet lors d'une exposition, illustrant le potentiel de la connectivité des objets du quotidien.
- **1999** : Kevin Ashton, alors directeur exécutif de l'Auto-ID Center du MIT, introduit le terme "Internet des Objets" pour décrire un réseau reliant des objets physiques via des technologies comme la RFID.
- **2008-2009** : Selon un livre blanc de Cisco, le nombre d'appareils connectés dépasse celui de la population mondiale, marquant la naissance officielle de l'IoT [3].

Depuis, l'IoT a connu une croissance exponentielle, intégrant des secteurs variés tels que la santé, l'industrie et la domotique, transformant notre interaction avec le monde connecté comme illustre la figure (2).

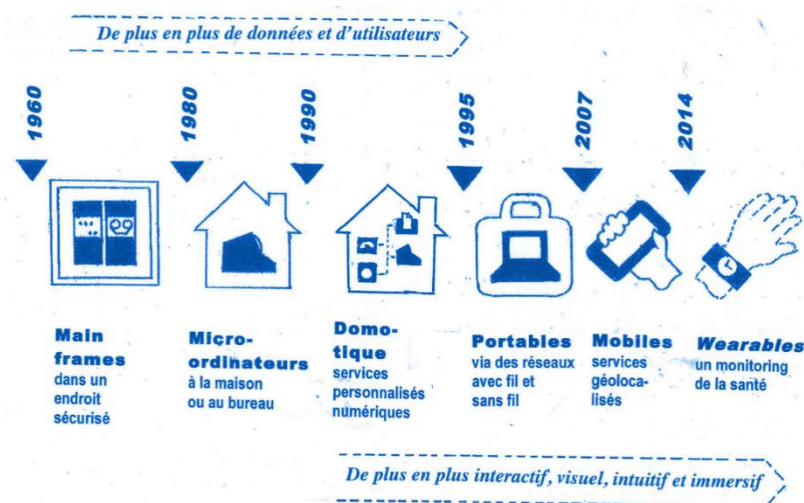


Figure 2 : L'évolution de l'IOT

## 1.4 Fonctionnement de l'IOT :

L'Internet des Objets (IoT) repose sur l'interconnexion d'objets physiques équipés de capteurs, de protocoles de communication et de systèmes de traitement des données, voir figure (3).

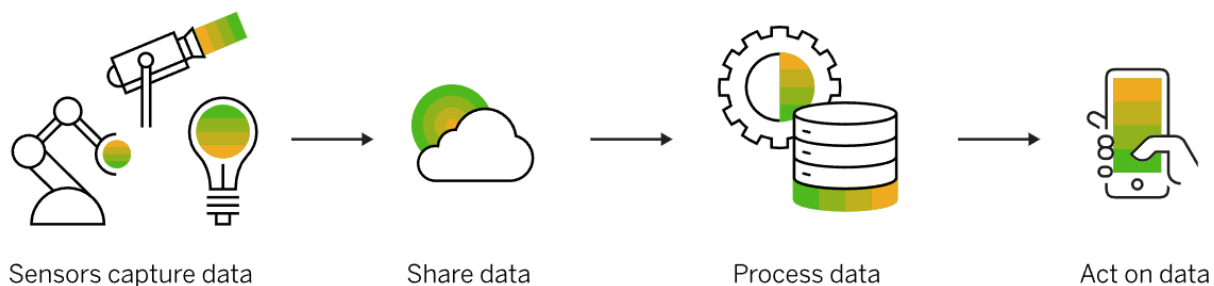


Figure 3 : Fonctionnement de l'IOT

1. **Capteurs** : Les objets connectés sont munis de capteurs qui collectent des données environnementales, telles que la température, l'humidité ou le mouvement. Ces capteurs convertissent les variations physiques en signaux électriques exploitables [4].

2. **Protocoles de communication** : Les données recueillies par les capteurs sont transmises via des protocoles de communication spécifiques, assurant une transmission sécurisée et optimale des informations. Ces protocoles définissent la manière dont les objets connectés échangent des données entre eux et avec des serveurs centralisés [5].
3. **Traitement des données** : Les informations transmises sont ensuite traitées et analysées, souvent dans des plateformes cloud. Ce traitement permet d'extraire des insights pertinents et de déclencher des actions appropriées en fonction des données reçues.

Au cœur de l'IoT se trouvent les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), composés de nombreux nœuds capteurs interconnectés. Chaque nœud comprend généralement [6] :

- **Unité de captage** : collecte les données environnementales.
- **Unité de traitement** : traite les données collectées et exécute des protocoles de communication.
- **Unité de transmission** : assure la communication sans fil avec d'autres nœuds ou avec une station de base.
- **Unité de gestion de l'énergie** : gère la consommation énergétique du nœud.

Ces nœuds communiquent entre eux pour transmettre les données collectées à un nœud central, souvent appelé "nœud puits" ou "station de base", qui centralise les informations pour une analyse plus approfondie.

Ainsi, l'IoT transforme des objets ordinaires en dispositifs intelligents capables d'interagir avec leur environnement et de fournir des informations en temps réel, ouvrant la voie à une multitude d'applications innovantes.

## 1.5 La structure d'un système de l'IOT :

L'architecture IoT est composée de plusieurs couches comme nous allons le voir maintenant, voir figure (4).

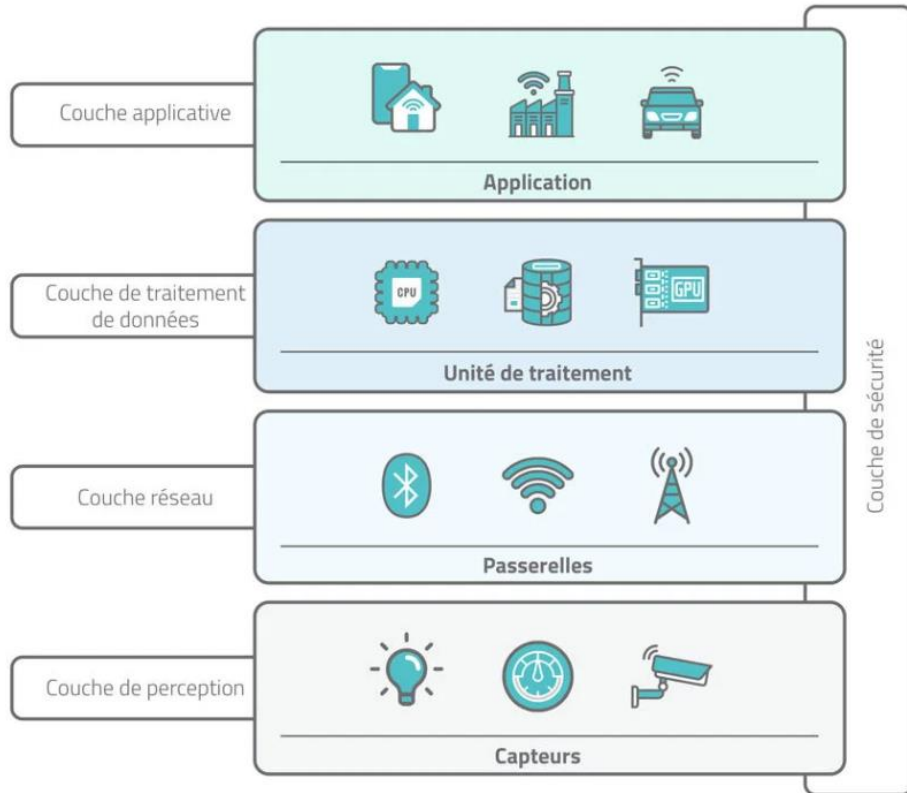


Figure 4 : La structure d'un système IOT

### La couche périphérique ou Perception Layer

Il s'agit de la toute première couche de l'architecture. Elle est composée de l'ensemble des capteurs et des dispositifs connectés chargés de collecter les données brutes et de les transmettre.

### La couche de passerelle ou Gateway Layer

Les passerelles servent d'intermédiaires entre les capteurs IoT et les serveurs d'applications dans le Cloud. Elles sont capables d'agréger et de filtrer les données reçues. Elles permettent également d'assurer la sécurité des données en utilisant un algorithme de chiffrement fort.

Les passerelles utilisent des technologies de communication sans fil comme le Wifi, le Bluetooth ou encore les réseaux mobiles. Certaines peuvent utiliser plusieurs technologies sans fil afin de garantir une connectivité suffisante même dans les zones particulièrement isolées.

### **La couche de traitement ou Processing Layer**

La couche de traitement est représentée par les serveurs situés dans le Cloud. C'est dans cette couche que sont effectuées toutes les opérations liées au traitement et à l'analyse des données recueillies. Les algorithmes de Machine Learning et d'intelligence artificielle sont très largement utilisés afin de transformer les données brutes reçues en données exploitables.

### **La couche d'application ou Application Layer**

Les applications utilisateurs composent la couche d'application. Elles permettent aux utilisateurs de consulter et d'utiliser les données de la façon la plus intuitive possible. Elles proposent généralement des tableaux de bord, des interfaces utilisateur.

### **La couche métier ou Business Layer**

La couche métier s'appuie sur la couche application. Elle inclut notamment des outils d'aide à la décision. Les informations utilisées sont mises en perspective avec les objectifs stratégiques et opérationnels de l'entreprise. Ces outils peuvent fournir par exemple des rapports sur la conformité aux normes de sécurité ou proposer des actions ou des interventions préventives afin d'améliorer la sécurité des travailleurs [7].

## **1.6 Internet industrielle des objets « Industrial Internet of Things »:**

L'internet industriel des objets consiste à utiliser l'internet et le Wi-Fi pour connecter toutes les parties d'une industrie ou d'un site de production intelligent. Cela est utilisé pour la communication entre les machines, les données des capteurs, le « Machine Learning », l'IA. Les technologies liées à ce principe permettent de collecter des informations à partir de machines installées au centre de l'usine ou de systèmes centralisés et de les transmettre au système d'information.

Le but du « Smart Manufacturing » est de pouvoir produire plus, avec efficacité et de façon plus intelligente. Pour ce faire, il est important de disposer à tout moment de l'état global de tous les systèmes de production, afin de pouvoir réagir intelligemment aux différents événements qui peuvent se produire. L'IoT également permet d'envoyer des messages ou des décisions directement aux machines, voir la figure (5).

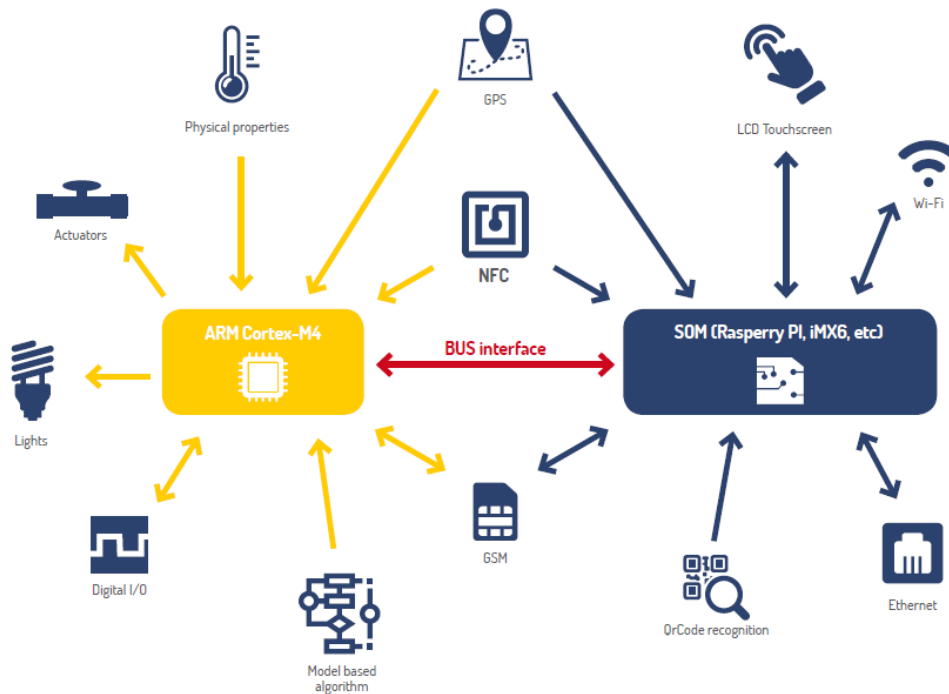


Figure 5 : L'IOT et l'industrie 4.0

## 1.7 Cloud Computing :

Le Cloud Computing est une technologie qui permet d'accéder à des ressources informatiques via Internet. Sans avoir à gérer une infrastructure physique. Cette approche offre une flexibilité inégalée. Permettant ainsi aux entreprises d'ajuster rapidement leurs ressources de calcul et de stockage en fonction de leurs besoins. Cette capacité à s'adapter rapidement est particulièrement précieuse dans un monde où les exigences peuvent changer du jour au lendemain.

En plus de la flexibilité, le Cloud Computing facilite également l'hébergement d'applications et le partage de logiciels. Ce qui permet une collaboration plus efficace parmi les utilisateurs.

Les entreprises ne paient que pour les ressources qu'elles utilisent réellement. Ce qui aide à éviter les coûts inutiles et à optimiser les dépenses. Voir la figure (6) ci-dessus.

En somme, le Cloud Computing offre une solution complète pour les besoins informatiques modernes, combinant efficacité, flexibilité et économie[8].

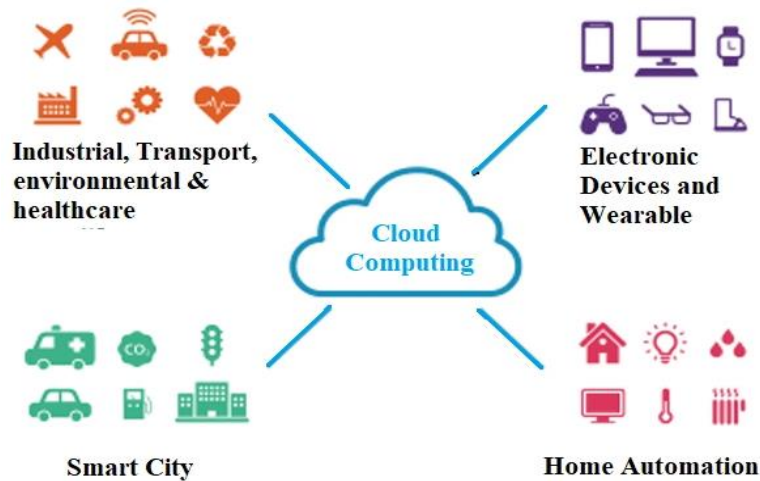


Figure 6 : Cloud Computing

### 1.7.1 Modèles de service du Cloud Computing :

Le Cloud en effet, sert à apporter de nouveaux services à l'entreprise, pour consommer les technologies de l'information d'une façon plus agile. Ce que nous désignons sous le nom de "Modèles de services", décrit les diverses catégories de services accessibles à travers une plateforme de Cloud. En d'autres termes, il s'agit des types de services qu'un fournisseur est en capacité d'offrir.

Les modèles de services les plus connus sont IaaS, PaaS et SaaS :

**Infrastructure en tant que Service (IaaS) :** Ce modèle offre des ressources informatiques virtualisées via Internet. Il permet aux entreprises de louer des serveurs, du stockage et des réseaux sur une base flexible, éliminant ainsi le besoin d'investir dans une infrastructure physique. Les utilisateurs ont le contrôle sur les systèmes d'exploitation et les applications déployées.

**Plateforme en tant que Service (PaaS) :** Ce service fournit une plateforme complète de développement et de déploiement d'applications, incluant l'infrastructure sous-jacente, les environnements d'exécution et les outils de développement. Il permet aux développeurs de se concentrer sur le codage sans se soucier de la gestion de l'infrastructure [9].

**Logiciel en tant que Service (SaaS) :** Ce modèle délivre des applications logicielles via Internet, accessibles depuis n'importe quel appareil connecté. Les fournisseurs gèrent l'infrastructure, la maintenance et les mises à jour, permettant aux utilisateurs de se concentrer uniquement sur l'utilisation du logiciel [10].

La figure ci-dessous (7) illustre cela :

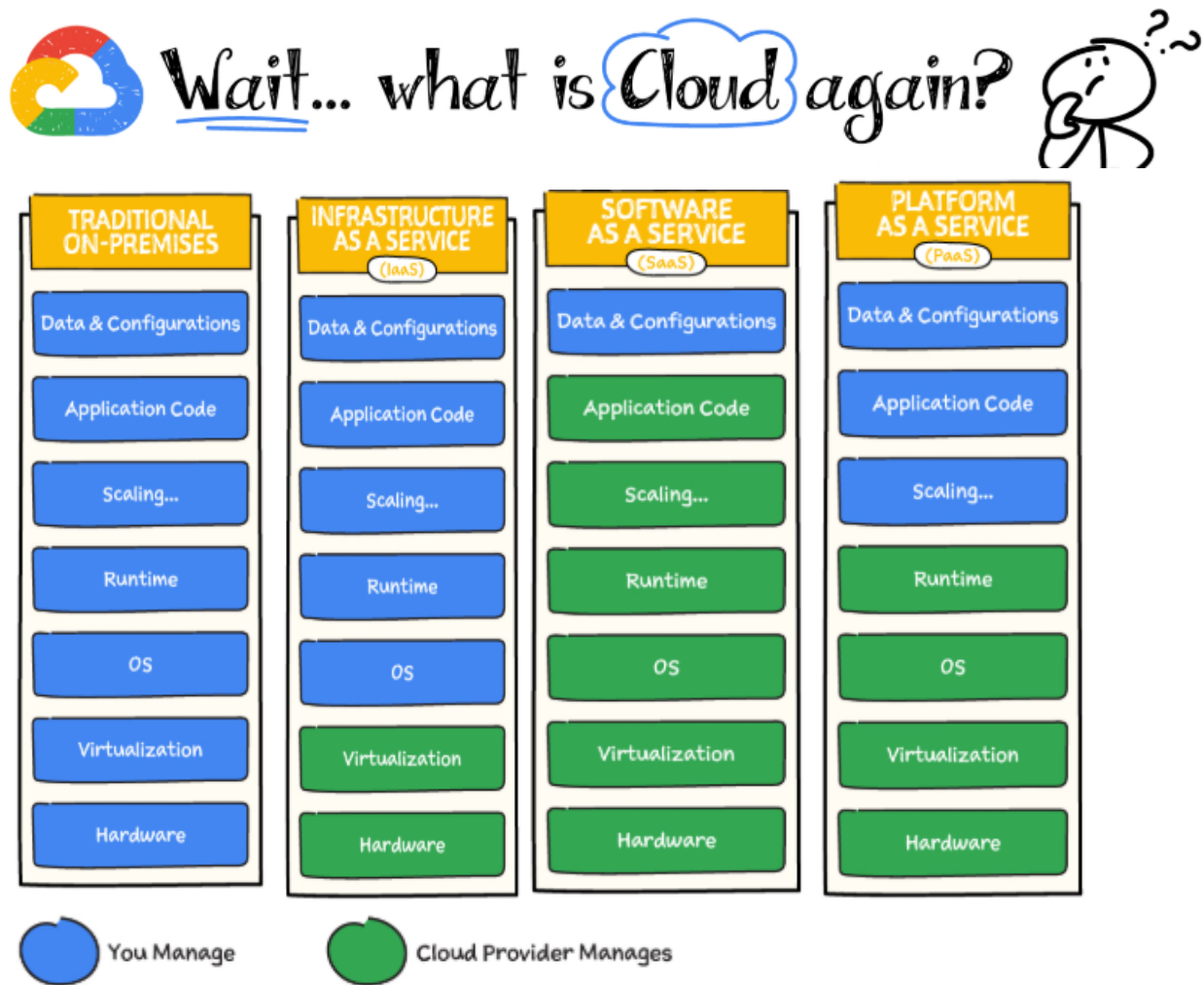


Figure 7 : Modèles de service du Cloud Computing

## 1.7.2 Modèles de déploiement :

Le passage vers le Cloud nécessite de spécifier le modèle de déploiement du Cloud Computing approprié au projet. Conformément au budget et à la politique de l'entreprise, chaque déploiement suit un ensemble de directives prédéfinies. Elles peuvent être liées à une gouvernance interne ou externe qui nécessite le stockage de données confidentielles en interne, ou elles peuvent être en réponse à des difficultés techniques ne permettant pas le déploiement complet des solutions Cloud. Dans ce qui suit nous citons les trois modèles principaux de déploiement :

**Cloud :** Les applications basées sur le modèle Cloud (voir figure 8), y sont entièrement déployées. Ces applications peuvent être des applications créées dans le Cloud, ou elles peuvent être migrées à partir d'une infrastructure locale existante pour tirer parti du Cloud Computing. Ils peuvent être construits sur des éléments d'infrastructure simples tels que le partage de fichiers et le stockage, mais ils peuvent également utiliser des services avancés pour gérer l'infrastructure, l'architecture et la gestion des exigences.

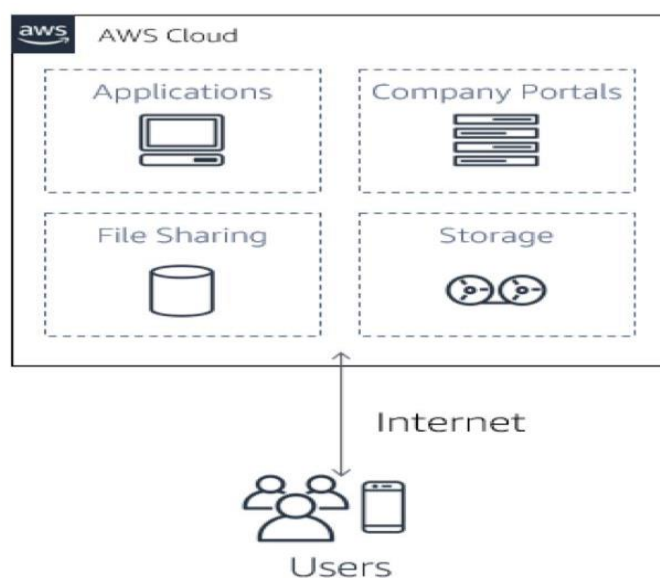


Figure 8 : Modèle de déploiement Cloud

**Hybride :** Un déploiement hybride (voir figure 9) permet de connecter l'infrastructure et les applications entre les ressources basées sur le Cloud et les systèmes sur site. Ce type de modèle peut développer et améliorer l'infrastructure dans le Cloud tout en se connectant aux systèmes internes via des connexions réseau sécurisées.

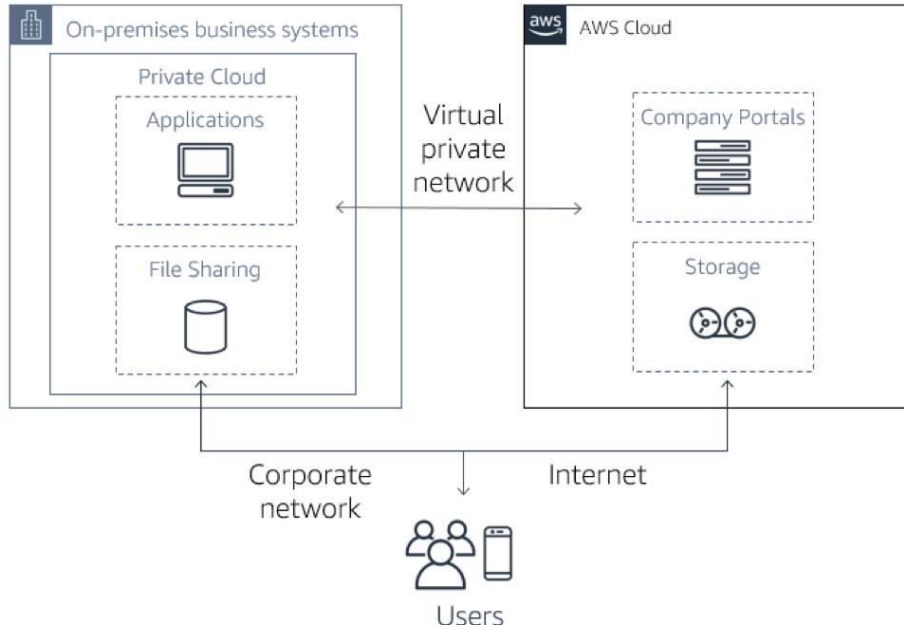


Figure 9 : Modèle de déploiement hybride

Fondamentalement, l'utilisation d'un modèle hybride peut être considérée comme un stockage de données local, ainsi que dans le Cloud. Cela est généralement fait pour stocker de manière économique de grandes quantités de données, utiliser de nouvelles bases de données natives du Cloud, permettre aux clients d'accéder aux données plus rapidement ou des solutions de sauvegarde et d'archivage rentables tout en maintenant une haute disponibilité.

**Sur site :** Le déploiement de ressources sur site (voir figure 10), effectué à l'aide de logiciels de virtualisation et d'outils de gestion des ressources, est également appelé Cloud privé. Le déploiement sur site n'apporte qu'une petite partie des avantages du Cloud Computing. Cependant, sa capacité à fournir des ressources dédiées au sein de l'emplacement physique lui permet parfois de se démarquer.

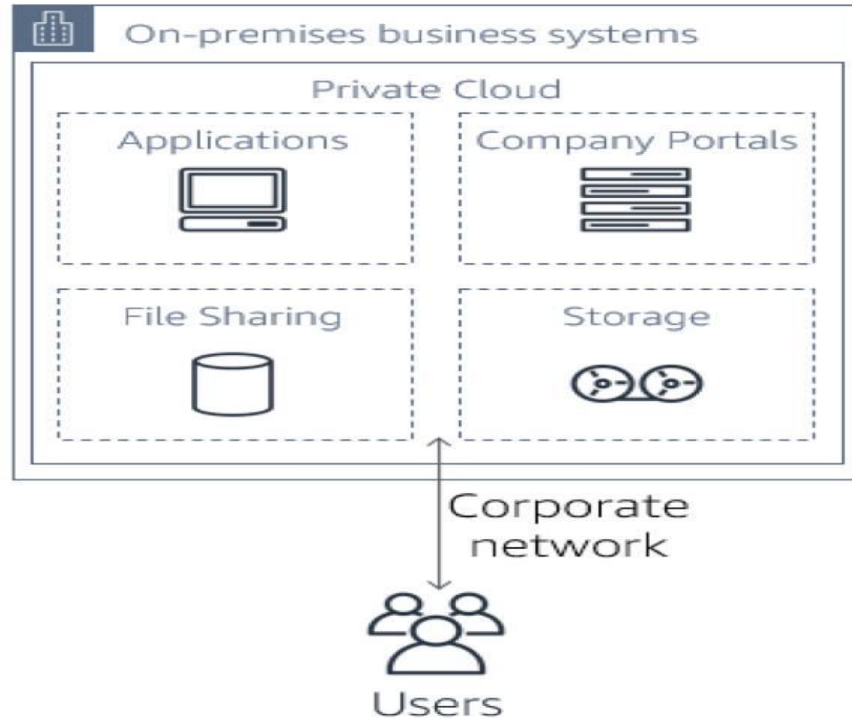


Figure 10 : Modèle de déploiement sur site

Dans ce modèle, on doit gérer toutes les dépenses d'exploitation du déploiement. Ces dépenses peuvent inclure l'entretien de l'infrastructure informatique, l'achat des licences logicielles et la rémunération des personnes nécessaires à la gestion de l'infrastructure physique [11].

### 1.7.3 Caractéristiques du Cloud Computing :

Le Cloud Computing devient de plus en plus populaire. L'expansion et le développement continus des organisations requièrent une grande puissance de calcul et des systèmes de conservation intensive des données. Le Cloud Computing permet aux entreprises de se développer et de transmettre en toute sécurité les données des sites physiques vers le « Cloud », accessible de n'importe quel emplacement. Le Cloud Computing possède plusieurs caractéristiques (voir figure 11) qui en font l'un des domaines à la croissance la plus rapide à l'heure actuelle. La flexibilité offerte par les services du Cloud Computing sous la forme d'un ensemble d'outils et de méthodes toujours plus large a accéléré son déploiement dans tous les secteurs.



Figure 11 : Caractéristiques du Clou Computing

**Grande disponibilité des ressources :** Ce service est créé pour servir différents clients, grâce au modèle multi-tenant. De multiples ressources physiques et virtuelles sont proposées et peuvent être adaptées en fonction de la demande du client. On peut dire que le client ne sait pas où sont enregistrées les données et qu'il n'en a même pas le contrôle.

**Service-Libre à la demande :** Il s'agit de l'une des caractéristiques principales et appréciables de l'informatique en nuage, car l'utilisateur peut vérifier en permanence le temps de fonctionnement du serveur, ses performances et l'espace de stockage réseau qui lui est affecté. Grâce à cette fonction, l'utilisateur peut également contrôler les capacités de calcul.

**Maintenance facile :** Les serveurs sont faciles à maintenir et le temps d'arrêt est très faible. Dans certains cas, il n'y a pas de temps d'arrêt. Le Cloud Computing propose une update à chaque fois en l'améliorant continuellement. Les mises à jour sont plus conformes aux dispositifs et fonctionnent plus rapidement que les anciennes versions, ainsi que les anomalies sont corrigées.

**Sécurité :** C'est l'une des meilleures caractéristiques du Cloud Computing. Il génère une copie des informations stockées afin que les données ne soient pas perdues même si l'un des serveurs est en panne. Les données sont sauvegardées dans les dispositifs de stockage qui ne peuvent pas être violés et utilisés par une autre personne. Le service de sauvegarde est rapide

et fiable. On peut y accéder de n'importe quel emplacement à l'aide d'un dispositif et d'une connexion Internet.

**Automatisation :** Le Cloud Computing analyse systématiquement les données nécessaires et prend en compte une capacité de calcul à un certain niveau de services. Cette utilisation permet de surveiller, de contrôler et de générer des rapports, offrant ainsi une transparence pour le serveur comme pour le client [12].

## 1.8 Fog Computing:

Le Fog Computing, aussi connu sous les termes « informatique en brouillard » ou « Infonébulisation », désigne une structure décentralisée de l'informatique qui prolonge les prestations du Cloud Computing vers le bord du réseau. Cette méthode facilite la proximité entre les capacités de calcul, de stockage et de mise en réseau et les sources de données, comme les appareils connectés (IoT), dans le but de traiter les informations à proximité de leur point d'origine [13].

### 1.8.1 Déploiement du Fog Computing:

Les nœuds Fog représentent une solution simple à un problème simple, c'est essentiel de comprendre quand et quand ne pas les utiliser :

- Les nœuds Fog sont employés lorsque les données sont complexes ou en grande quantité et qu'elles doivent être analysées localement, ce qui risque de surcharger l'appareil en périphérie qui consomme les données. En d'autres mots, nous avons besoin d'un élément qui réponde en temps réel ou presque, comme un robot d'usine qui se désactive lorsque les serveurs surchauffent, cela doit être immédiat ;
- Les nœuds Fog sont employés lorsque les données collectées provenant de divers types de composants périphériques ou lorsqu'on envoie plusieurs types de données. Le nœud Fog gère le traitement des données provenant de plusieurs équipements de périphérie à la fois, en s'occupant de la transformation sémantique des données avant de les envoyer aux serveurs Cloud. Le nœud Fog peut également gérer et répondre directement au dispositif périphérique [14].

Les nœuds Fog sont utilisés lorsqu'un opérateur doit attendre le retour de la réponse vers le périphérique. Comme la nécessité de répondre à des événements qui ne peuvent pas attendre, les opérateurs doivent être considérés comme des composants architecturaux en temps quasi réel.

### 1.8.2 Comment fonctionne le Fog Computing:

Les programmeurs développent des applications IoT pour les nœuds Fog à la périphérie du réseau. Les nœuds Fog les plus près de la périphérie du réseau collectent les données du dispositif IoT. Ensuite l'application Fog IoT dirige divers types de données à l'emplacement idéal pour l'analyse, comme indiqué dans le tableau (1) suivant :

Tableau 1 : Fonctionnement du Fog Computing

	Fog Nodes Closest to IoT Devices	Fog Aggregation Nodes	Cloud
<b>Response time</b>	Milliseconds to subsecond	Seconds to minutes	Minutes, days, weeks
<b>Application examples</b>	M2M communication Haptics <sup>2</sup> , including telemedicine and training	Visualization Simple analytics	Big data analytics Graphical dashboards
<b>How long IoT data is stored</b>	Transient	Short duration: perhaps hours, days, or weeks	Months or years
<b>Geographic coverage</b>	Very local: for example, one city block	Wider	Global

Les données les plus sensibles au temps sont analysées sur le nœud Fog le plus proche des éléments générant les données. Dans un réseau de distribution Smart Grid de Cisco, par exemple, l'exigence la plus sensible au facteur temps est de vérifier que les boucles de protection et de contrôle fonctionnent correctement. Par conséquent, les nœuds Fog les plus proches des capteurs du réseau peuvent détecter les signes de problèmes, puis les prévenir en envoyant des commandes de contrôle aux actionneurs ;

Les données qui peuvent attendre quelques secondes ou minutes pour une action sont transmises à un nœud d'agrégation pour l'analyse et l'action. Dans l'exemple Smart Grid, chaque sous-station peut avoir son propre nœud d'agrégation qui rapporte l'état opérationnel de chaque départ avale et latéral.

Les données moins sensibles au facteur temps sont envoyées sur le Cloud pour une analyse historique, une analyse des Big Data et un stockage à long terme. Par exemple, chacun des milliers de nœuds de brouillard peut envoyer des résumés périodiques des

données de la grille au nuage pour une analyse historique et un stockage des résumés périodiques des données.

### 1.8.3 Avantages du Fog Computing:

L'extension du Cloud au plus près des objets qui génèrent et exploitent les données est bénéfique pour l'entreprise de la manière suivante [15] :

- ✓ **Une plus grande agilité commerciale** : avec les bons outils, les développeurs peuvent rapidement développer des applications Fog et les installer là où cela est nécessaire. Les producteurs des machines peuvent proposer du MaaS à leurs clients. Les applications de brouillard programment la machine pour qu'elle fonctionne de la manière dont chaque client a besoin.
- ✓ **Une Meilleure sécurité** : cela nécessite une protection des nœuds Fog à travers la même politique, le même contrôle et les mêmes procédures utilisées dans les autres parties du système informatique. Ainsi que l'utilisation des mêmes solutions de sécurité physique et de Cybersécurité.
- ✓ **Des informations plus approfondies, avec un contrôle de la confidentialité** : un traitement des données sensibles est effectué localement au lieu de les transmettre au Cloud pour les analyser. En outre, l'équipe informatique peut surveiller et contrôler les dispositifs qui collectent, traitent et stockent les données.
- ✓ **Réduction des frais d'exploitation** : la nécessité de conserver la bande passante du réseau en traitant localement les données sélectionnées au lieu de les envoyer dans le Cloud pour les traiter.

## 1.9 Conclusion :

L'IoT (Internet des Objets) est un élément clé dans l'évolution de l'industrie vers l'Industrie 4.0. En reliant des appareils, des capteurs et des systèmes, il offre la possibilité d'une surveillance en direct, d'une maintenance anticipative et d'une amélioration des processus de production. Bien que la sécurité et l'interopérabilité posent des problèmes, l'IoT industriel permet d'obtenir d'importants bénéfices en termes de productivité, de qualité et d'efficacité.

# **Chapitre 2 :**

# **L'industrie 4.0**

## **2.1 Introduction :**

Le paysage industriel mondial connaît une transformation profonde, portée par l'émergence de nouvelles technologies et de paradigmes orientés vers l'intelligence, l'interconnexion et la flexibilité des systèmes de production. Dans ce contexte, de nombreuses entreprises réévaluent leurs processus, leurs outils et leurs méthodes pour s'adapter à un environnement en constante évolution, où la rapidité de réaction, la traçabilité et l'optimisation en temps réel sont devenues des exigences majeures.

Cette dynamique de transformation ne se limite pas à l'introduction de technologies de pointe : elle implique également une reconfiguration des modèles organisationnels, des stratégies de gestion et des interactions entre les différents acteurs de la chaîne de valeur. La convergence entre le monde physique et le monde numérique offre ainsi de nouvelles opportunités, mais soulève également des enjeux complexes, tant sur le plan technique que sur le plan humain.

L'objectif est d'explorer cette mutation industrielle à travers les principaux leviers technologiques, les évolutions des systèmes de production, ainsi que les impacts concrets observés dans des secteurs clés. Il s'agit de mieux comprendre les enjeux de modernisation auxquels font face les industries actuelles, et les perspectives qu'offre cette nouvelle ère.

## **2.2 Définition de l'industrie 4.0:**

La quatrième révolution industrielle (ou industrie 4.0) est l'automatisation en cours de la fabrication traditionnelle et des pratiques industrielles, à l'aide de technologies intelligentes modernes. La communication machine-machine (M2M) à grande échelle et l'internet des objets (IoT) sont intégrés pour une automatisation accrue, une communication et une auto-surveillance améliorées. Ainsi que la production de machines intelligentes qui sont capables d'analyser et de diagnostiquer les problèmes sans intervention humaine [16].

## **2.3 Pourquoi l'industrie 4.0:**

L'industrie 4.0 n'est ni une nouvelle forme de technologie, ni un modèle d'entreprise, mais bien une nouvelle démarche inspirée par de nouvelles évolutions, pour parvenir à des résultats qui n'étaient pas possibles il y a dix ans.

La première révolution industrielle a vu la Grande-Bretagne évoluer de l'agriculture à la fabrication en usine au 19<sup>e</sup> siècle. La deuxième s'est étendue des années 1850 à la Première Guerre mondiale et a commencé avec l'introduction de l'acier, pour se terminer par l'électrification précoce des usines et les premiers progrès de la fabrication en série. Enfin, la troisième révolution industrielle fait référence au passage de la technologie analogique, mécanique et électronique à la technologie digitale qui a eu lieu de la fin des années 1950 à la fin des années 1970. La quatrième, donc, est le passage à la numérisation. L'industrie 4.0 utilise l'internet des objets et les systèmes cyber-physiques tels que les capteurs pour collecter de grandes quantités de données qui peuvent être utilisées par les fabricants et les producteurs pour analyser et améliorer leur travail.

Les progrès récents en matière de Big Data et de plates-formes d'analyse, permettent aux systèmes d'explorer d'énormes ensembles de données et de produire des informations sur lesquelles il est possible d'agir rapidement. Les usines intelligentes, qui seront au cœur de l'industrie 4.0, adopteront les technologies de l'information et de la communication, pour faire évoluer la chaîne de production et de distribution vers un degré d'automatisation et de numérisation beaucoup plus élevé. Cela implique que les machines utilisent l'auto-optimisation, l'auto-configuration et même l'intelligence artificielle, pour effectuer des tâches complexes afin de réaliser des réductions de coûts largement supérieures et des produits ou services de meilleure qualité.

La figure (12) résume l'historique des révolutions industrielles de 1784 jusqu'à ce jour [17].

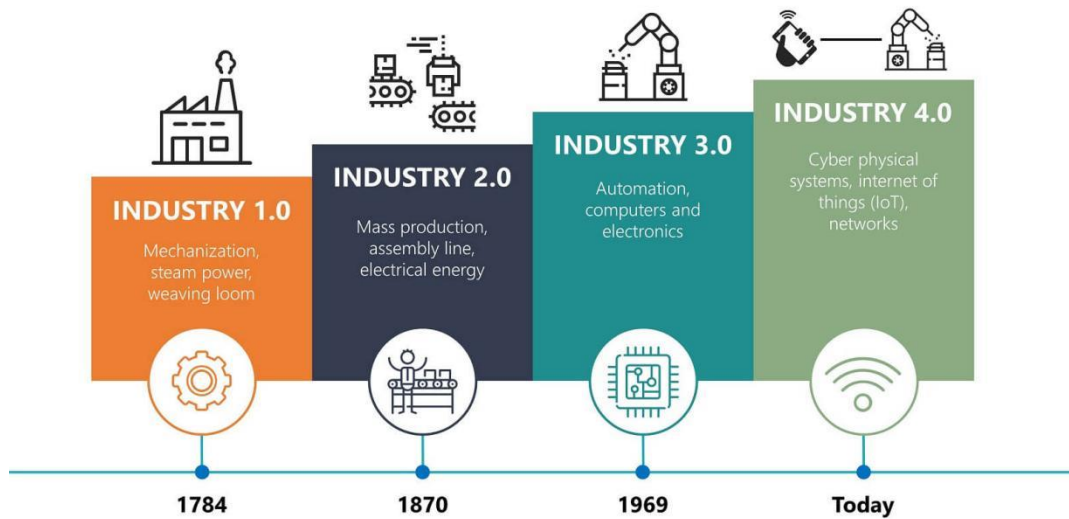


Figure 12 : L'évolution industrielle

## 2.4 Facteur humain dans l'industrie 4.0:

L'industrie 4.0 prédit que les processus industriels, l'infrastructure technologique et tous les processus commerciaux concernés, soutenus par les technologies de l'information et de la communication (TIC), évolueront vers des systèmes intégrés, ad hoc interconnectés et des systèmes de fabrication cyber physique décentralisés, dotés de capacités d'auto-optimisation et d'adaptabilité en temps réel.

Face à cette révolution, l'être humain jouera toujours un rôle majeur, car on ne prévoit pas, dans un avenir prévisible, que le facteur humain avec ses caractéristiques et ses compétences, sera complètement remplacé par une technologie fonctionnant de manière autonome. L'intelligence mécanique, par exemple, se limite à la sélection d'options prédéfinies, tandis que la créativité humaine, la flexibilité, la capacité d'apprendre et de s'améliorer sont exigées pour élaborer et configurer des systèmes, des processus et des produits. La figure (13) montre que l'être humain dispose de l'expérience nécessaire pour analyser, évaluer et résoudre - même dans des situations particulières [18].

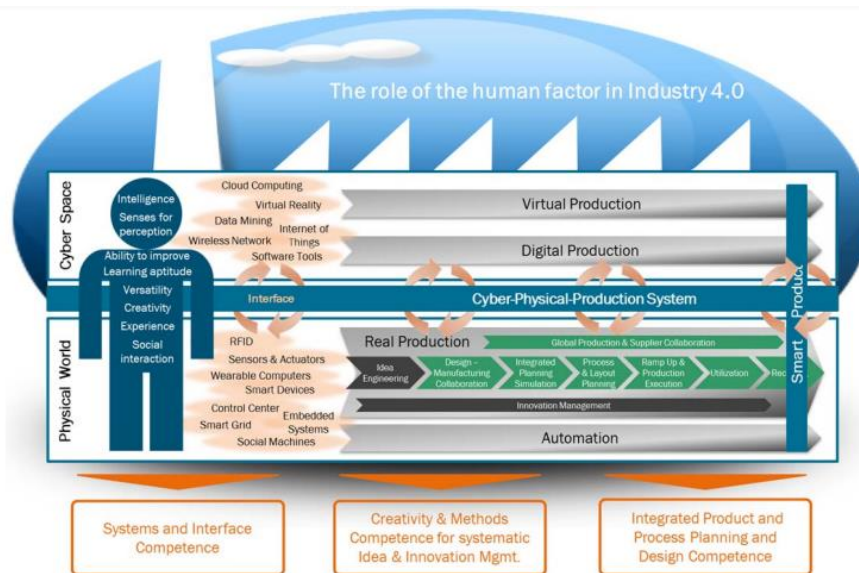


Figure 13 : L'homme et l'industrie 4.0

## 2.5 Technologies fondamentales de l'industrie 4.0 :

L'Industrie 4.0 repose sur un ensemble intégré de technologies avancées qui transforment les systèmes de production traditionnels en environnements intelligents, interconnectés et autonomes. (Voir la figure 14)



Figure 14 : Les composants de l'industrie 4.0

Parmi ces composants, plusieurs sont essentiels à la mise en place d'un système de surveillance et d'optimisation énergétique pour un four industriel :

**L'Internet des Objets (IoT)** permet la connexion des machines, capteurs et équipements industriels à Internet afin de collecter et transmettre des données en temps réel. Cela facilite la supervision des performances énergétiques et le suivi des paramètres critiques.

**Les systèmes Cyber-Physiques (CPS)** associent des éléments physiques (comme les machines) à des algorithmes de contrôle numérique, rendant possible une interaction fluide et intelligente entre le monde réel et virtuel.

**Le Cloud Computing** offre une infrastructure de stockage et de traitement à distance, permettant l'accès aux données de production depuis n'importe quel point du réseau, et facilitant leur analyse centralisée.

**L'intelligence artificielle (IA)** et l'apprentissage automatique permettent de traiter les données collectées, d'en extraire des modèles, de détecter des anomalies et de mettre en œuvre des mécanismes de maintenance prédictive.

**Le Big Data** joue un rôle crucial dans le traitement d'importants volumes de données générés par les systèmes industriels connectés, ouvrant la voie à une analyse approfondie et à une optimisation continue des processus.

**Les technologies de réalité augmentée (AR)** permettent d'assister les opérateurs dans les tâches de maintenance ou de contrôle en superposant des données numériques au monde réel.

**La cybersécurité** est essentielle pour protéger les systèmes industriels contre les cybermenaces, assurer l'intégrité des données et garantir la disponibilité des services.

**Les communications machine-to-machine (M2M)** et les protocoles industriels (tels que OPC-UA ou MQTT), parfois renforcés par les réseaux à haute performance comme la 5G, assurent une communication fluide et fiable entre les différents éléments du système de production.

**L'intégration verticale et horizontale** permet de connecter l'ensemble des niveaux d'une organisation (du capteur au système de gestion), tout en assurant l'interopérabilité entre les différentes chaînes de production [19].

## **2.6 Avantages de l'industrie 4.0 appliqués à un système IoT pour four industriel :**

- ✓ Surveillance en temps réel grâce à l'Internet des Objets (IoT), qui permet de collecter des données en continu sur les équipements industriels.
- ✓ Maintenance prédictive rendue possible par l'analyse des données historiques et en temps réel.
- ✓ Réduction des coûts énergétiques grâce à l'optimisation automatique des paramètres de production.
- ✓ Automatisation intelligente et prise de décision basée sur les données, limitant l'intervention humaine.
- ✓ Visualisation centralisée via des tableaux de bord numériques, facilitant le contrôle des opérations.
- ✓ Amélioration de la qualité et de la performance des processus industriels.
- ✓ Traçabilité complète des opérations de production, utile pour le diagnostic et l'amélioration continue [20].

## **2.7 Domaines d'application de l'industrie 4.0 :**

L'Industrie 4.0, souvent appelée quatrième révolution industrielle, désigne l'intégration des technologies numériques avancées dans les processus industriels, notamment l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), le Big Data, la robotique intelligente, la réalité augmentée, et la fabrication additive.

Cette transformation profonde ne se limite pas à la production : elle redéfinit l'ensemble des chaînes de valeur, de la conception à la maintenance, en passant par la logistique et la qualité. Au-delà du secteur manufacturier, les principes de l'Industrie 4.0 trouvent aujourd'hui des applications dans de nombreux domaines tels que la santé (Health 4.0), l'énergie (Smart Grid), l'agriculture (Agri 4.0), la logistique intelligente, et même l'éducation (Education 4.0). Chaque secteur adapte les technologies de l'Industrie 4.0 selon ses besoins spécifiques afin d'améliorer la productivité, la flexibilité, la qualité de service et la durabilité.

Ainsi, comprendre les domaines d'application de l'Industrie 4.0 est essentiel pour évaluer son impact concret sur les systèmes socio-économiques modernes et anticiper les évolutions futures des métiers, des compétences et des infrastructures.

### 2.7.1 La santé :

Appelé aussi Health 4.0 est un concept dérivé de l'Industrie 4.0, qui désigne la transformation numérique du secteur de la santé à travers l'intégration des technologies émergentes telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), le Big Data, la robotique, la réalité augmentée et la blockchain [21].(voir figure 15).

Les objectifs stratégiques de Santé 4.0 :

**Améliorer la qualité des soins :** L'intégration de l'IA, du Big Data et de l'IoT permet de fournir des soins plus rapides, plus précis et plus personnalisés. Par exemple, les algorithmes de diagnostic assisté par IA peuvent détecter des maladies (comme le cancer ou les troubles cardiaques) à un stade plus précoce que les méthodes traditionnelles [22].

**Personnaliser les traitements médicaux :** Les technologies Health 4.0 permettent une médecine de précision en adaptant les traitements aux caractéristiques génétiques et comportementales de chaque **patient**.

**Renforcer la prévention et la surveillance à distance :** Grâce à des dispositifs connectés (bracelets, capteurs, montres intelligentes), les professionnels peuvent surveiller en temps réel l'état de santé des patients chroniques ou à risque, même à domicile. Cela permet d'intervenir plus rapidement en cas de problème.

**Renforcer l'autonomie du patient ("Empowerment"):** L'un des piliers de Health 4.0 est de donner plus de pouvoir au patient : accès à ses données médicales, outils d'auto-surveillance, applications mobiles de santé, interactions directes avec des plateformes de santé en ligne [23].

**Accroître l'efficacité des structures de santé :** Les hôpitaux intelligents utilisent la robotique, l'automatisation des flux de patients, et la gestion optimisée des ressources (lits, médicaments, personnel) pour améliorer la productivité et réduire les coûts.

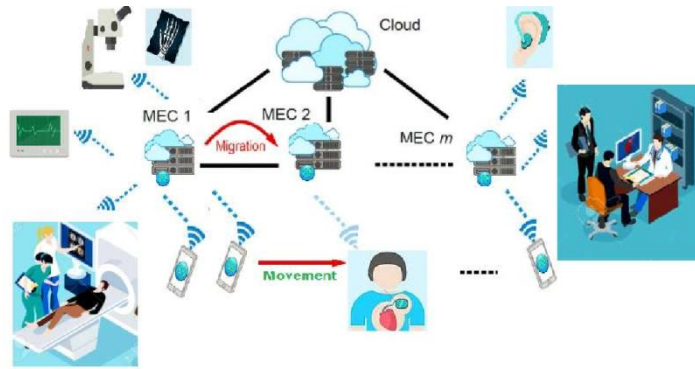


Figure 15 : Santé 4.0

Voici un tableau de comparaison Santé 1.0 → 4.0 :

Tableau 2 : L'évolution de la santé numérique

Version	Période	Caractéristiques principales	Technologies associées
<b>Santé 1.0</b>	Avant 1990	-Médecine traditionnelle - Soins curatifs - Papier/dossiers physiques	Aucune (système analogique)
<b>Santé 2.0</b>	1990–2010	-Apparition du web santé (forums, blogs, wikis) -Accès des patients à l'information médicale - Début de la participation des patients	Web 1.0 Moteurs de recherche Email
<b>Santé 3.0</b>	2010–2020	-e-santé -Partage des données entre professionnels -Approche patient centrée sur les données -Début de la personnalisation des soins	Dossiers électroniques Cloud Computing Apps mobiles santé
<b>Santé 4.0</b>	Depuis 2020	-Médecine personnalisée, prédictive, préventive, participative -Technologies intelligentes (IA, IoT, Blockchain, 5G) -Hôpitaux connectés et automatisés -Empowerment total du patient	IA, IoT, Big Data, Blockchain, Robotique, 5G

### **2.7.2 Industrie du pétrole et du gaz :**

L'industrie du pétrole et du gaz bénéficie considérablement des technologies de l'Industrie 4.0 pour améliorer la productivité, la sécurité et la rentabilité. L'intégration de capteurs IoT dans les pipelines et les plateformes offshore permet une surveillance en temps réel des conditions de fonctionnement, réduisant les risques d'incidents majeurs. De plus, les algorithmes d'intelligence artificielle et les jumeaux numériques permettent d'anticiper les pannes, d'optimiser les opérations de forage, et de simuler des scénarios complexes sans interrompre l'exploitation. La robotique est également utilisée pour effectuer des inspections dans des environnements à haut risque, réduisant l'exposition humaine. Grâce à ces innovations, les entreprises du secteur peuvent réduire leurs coûts opérationnels tout en améliorant la sécurité et la durabilité de leurs activités [24].

### **2.7.3 Bureau intelligent (Smart Office):**

Le bureau intelligent, ou Smart Office, applique les technologies de l'Industrie 4.0 pour offrir un environnement de travail flexible, connecté et écoénergétique. En intégrant des capteurs environnementaux, des dispositifs IoT et des systèmes d'analyse en temps réel, ces espaces permettent une gestion automatisée de l'éclairage, de la température, de l'occupation des salles et de la qualité de l'air. Les employés bénéficient d'un confort accru, de meilleures conditions de collaboration à distance, et d'un environnement adapté à leurs besoins grâce à l'intelligence artificielle. Ces technologies favorisent également la productivité, réduisent la consommation d'énergie et soutiennent le travail hybride post-pandémie. Le Smart Office contribue ainsi à transformer les espaces professionnels traditionnels en écosystèmes intelligents et durables [25].

### **2.7.4 Logistique et Internet industriel :**

Le secteur de la logistique a toujours été à l'avant-garde de l'IIoT, car une grande quantité d'opportunités et de méthodes s'ajuste parfaitement à l'industrie logistique.

Ainsi, il n'est pas étonnant que le secteur de la logistique utilise depuis un certain temps un grand nombre de capteurs et de technologies liées à l'IIoT. Par exemple, le secteur de la logistique a depuis longtemps recours à la technologie des codes-barres pour les emballages, les palettes et les containers comme méthode pour trier les arrivées de marchandises et les

envois actifs depuis leurs dépôts. Il s'agissait d'un progrès monumental dans la technologie antérieure pour examiner véritablement chaque bon de transport lié et confirmer les éléments.

Toutefois, l'emploi de scanners de codes-barres manuels nécessitait encore un effort considérable et malgré une précision à chaque fois qu'ils étaient utilisés de manière constante, des palettes, des objets omis ou non détectés demeuraient encore. Dans le cadre de ces politiques de gestion des stocks, les organisations stratégiques ont opté pour un système informatisé en utilisant des techniques IIoT et des innovations à distance selon la figure 16.

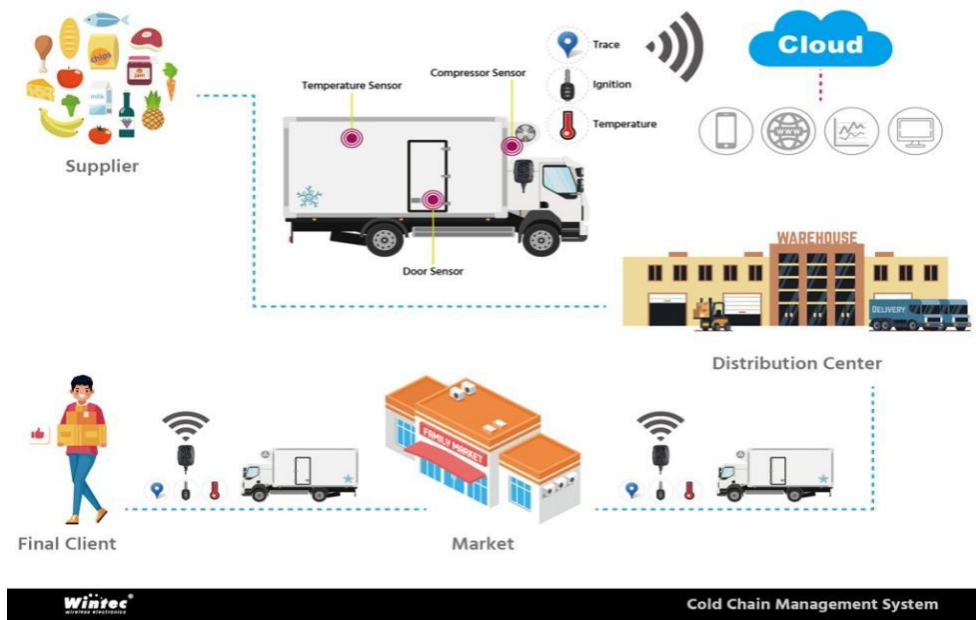


Figure 16 : Logistique 4.0

### 2.7.5 Smart home :

Une maison intelligente, voir figure (17), est une résidence équipée de dispositifs technologiques qui permettent une gestion automatisée et connectée des systèmes domotiques, tels que l'éclairage, le chauffage, la climatisation, la sécurité, et les appareils électroménagers. Ces systèmes sont contrôlables à distance via des smartphones, tablettes ou assistants vocaux comme Amazon Alexa ou Google Assistant [26].

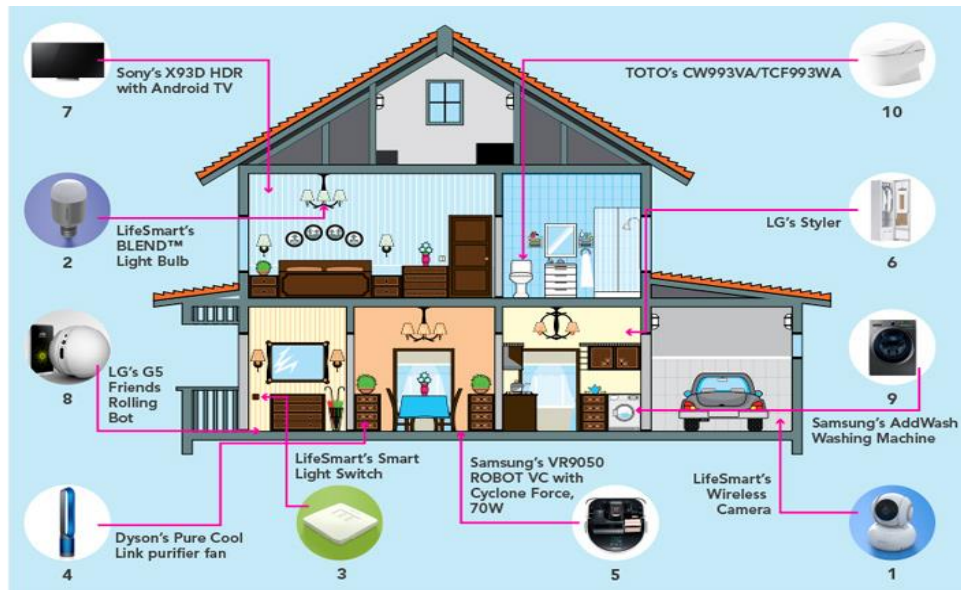


Figure 17 : Maison intelligente

## 2.8 L'IoT et l'optimisation énergétique dans le contexte de l'Industrie 4.0 :

L'Industrie 4.0 repose sur l'intégration de technologies avancées telles que l'Internet des Objets (IoT), le Cloud Computing, l'intelligence artificielle et l'analyse de données massives, afin de transformer les systèmes de production en entités intelligentes, connectées et autonomes [27].

L'IoT, en particulier, joue un rôle clé dans cette transformation en permettant la collecte et la transmission en temps réel de données issues des équipements industriels.

Dans le domaine de la gestion énergétique, l'IoT permet de mettre en œuvre des stratégies de surveillance intelligente, conduisant à une réduction des consommations énergétiques et à une amélioration de l'efficacité globale des systèmes. Des capteurs intelligents peuvent être déployés sur des machines industrielles pour mesurer des paramètres critiques (température, courant, consommation énergétique, etc.), et ces données sont ensuite traitées pour optimiser le fonctionnement des équipements [28].

L'application de ces technologies à des systèmes thermiques tels que les fours industriels permettent, par exemple, de contrôler précisément la température, d'adapter

automatiquement les consignes en fonction de la demande ou des conditions de fonctionnement, et de détecter les pertes énergétiques ou les dérives anormales. Cette approche contribue à une meilleure efficacité énergétique, à une réduction des coûts de production et à une diminution de l'impact environnemental [29].

Ainsi, l'intégration de l'IoT pour la gestion énergétique s'inscrit pleinement dans les objectifs de l'Industrie 4.0 : rendre les processus industriels plus intelligents, autonomes et durables.

## **2.9 Conclusion :**

L'Industrie 4.0 représente une rupture majeure dans l'évolution des systèmes de production, marquant le passage d'une automatisation classique à des environnements industriels intelligents, connectés et réactifs. En s'appuyant sur des technologies telles que l'Internet des Objets (IoT), le Cloud Computing, l'intelligence artificielle, la cybersécurité et la réalité augmentée, cette quatrième révolution industrielle vise à optimiser l'efficacité, la flexibilité et la durabilité des processus industriels.

Ce chapitre a permis de présenter les fondements conceptuels de l'Industrie 4.0, ses technologies clés, ainsi que ses principaux domaines d'application. Une attention particulière a été accordée à l'IoT et à la gestion énergétique intelligente, en lien direct avec le sujet du présent mémoire.

En effet, l'intégration de solutions IoT pour la surveillance et l'optimisation énergétique s'inscrit pleinement dans la logique de l'Industrie 4.0. Elle permet non seulement de collecter des données en temps réel, mais aussi de prendre des décisions éclairées pour améliorer les performances énergétiques des systèmes industriels. Dans le cas particulier des fours industriels, cette approche ouvre la voie à un pilotage plus fin, plus économique et plus respectueux de l'environnement.

Ainsi, l'Industrie 4.0 ne se limite pas à une transformation technologique ; elle constitue également un levier stratégique pour répondre aux enjeux de compétitivité, de transition énergétique et de développement durable dans l'industrie moderne.

# **Chapitre 3 :**

## **Modélisation et conception**

### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous expliquerons en détail comment nous avons modélisé et conçu notre système en utilisant les concepts principaux d'UML.

### 3.2 Langage de conception UML :

Le langage UML (Unified Modeling Language, ou langage de modélisation unifié) a été pensé pour être un langage de modélisation visuelle commun, et riche sémantiquement et syntaxiquement. Il est destiné à l'architecture, la conception et la mise en œuvre de systèmes logiciels complexes par leur structure aussi bien que leur comportement. L'UML a des applications qui vont au-delà du développement logiciel, notamment pour les flux de processus dans l'industrie.

Il ressemble aux plans utilisés dans d'autres domaines et se compose de différents types de diagrammes. Dans l'ensemble, les diagrammes UML décrivent la limite, la structure et le comportement du système et des objets qui s'y trouvent.

Ce n'est pas un langage de programmation, mais il existe des outils qui peuvent être utilisés pour générer du code en plusieurs langages à partir de diagrammes. Il a une relation directe avec l'analyse et la conception orientées objet [30].

### 3.3 Les diagrammes UML utilisés :

Dans notre recherche, nous avons utilisé divers types de diagrammes UML :

**Diagramme de contexte :** Un diagramme de contexte sert à représenter les échanges entre un système logiciel interne et les entités extérieures qui entrent en interaction avec ce dernier. L'objectif majeur consiste à accompagner les entreprises dans la compréhension de l'ampleur d'un système. Ainsi, cela leur offre la possibilité d'identifier l'approche optimale pour créer un nouveau système, en détaillant ses spécifications, ou pour perfectionner un système déjà en place.

**Diagramme de cas d'utilisation :** Les scénarios d'utilisation illustrent le fonctionnement d'un système en se référant aux actions et réponses d'un utilisateur. Ces éléments déterminent les frontières du système ainsi que les interactions entre le système et son environnement.

**Diagramme de classe :** Le schéma de classe illustre de façon globale la structure statique d'un système, en se référant aux classes et aux relations entre ces classes qui peuvent être : de dépendance, de généralisation ou d'association. Il inclut également des interfaces, des collaborations, et ainsi de suite.

**Diagramme de séquence :** Un diagramme de séquence est constitué d'un ensemble d'objets, symbolisés par des chemins de vie, et les échanges de messages entre ces objets lors de leur interaction.

**Diagramme d'activité :** Un diagramme d'activité est une adaptation des diagrammes d'états-transitions, structurée en fonction des actions et principalement conçue pour illustrer le comportement interne d'une méthode (l'exécution d'une opération) ou d'un cas d'utilisation.

## 3.4 Exigence fonctionnelle :

### 3.4.1 Diagramme de contexte

Le diagramme de contexte est donné par la figure (18) suivante :

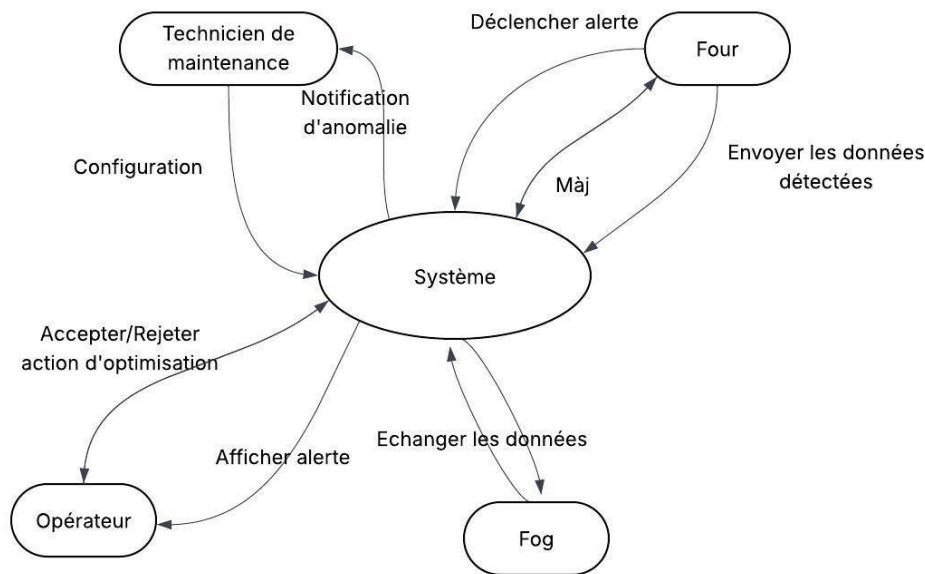


Figure 18 : Diagramme de contexte

Dans ce système, le four joue un rôle essentiel en envoyant en temps réel les données détectées (telles que la température.) vers le système. Ce dernier les analyse pour détecter d'éventuelles anomalies ou situations critiques. En cas de besoin, le système met à jour ses

informations et peut déclencher une alerte. Cette alerte est ensuite notifiée au technicien de maintenance, qui peut intervenir en configurant ou ajustant le système. Le technicien peut aussi recevoir une notification d'anomalie automatiquement. En parallèle, le système interagit également avec l'opérateur, en lui affichant des alertes et en lui permettant de valider ou rejeter les actions d'optimisation proposées. D'autre part, le système échange des données avec la couche Fog, permettant un traitement distribué plus rapide et localisé des informations collectées. L'ensemble de ces interactions montre comment le système central joue un rôle de coordination entre les données du four, les actions humaines et les infrastructures informatiques (Fog), assurant ainsi une gestion intelligente et optimisée du four industriel.

### 3.4.2 Diagramme de cas d'utilisation :

Le diagramme de cas d'utilisation est donné par la figure (19) suivante :

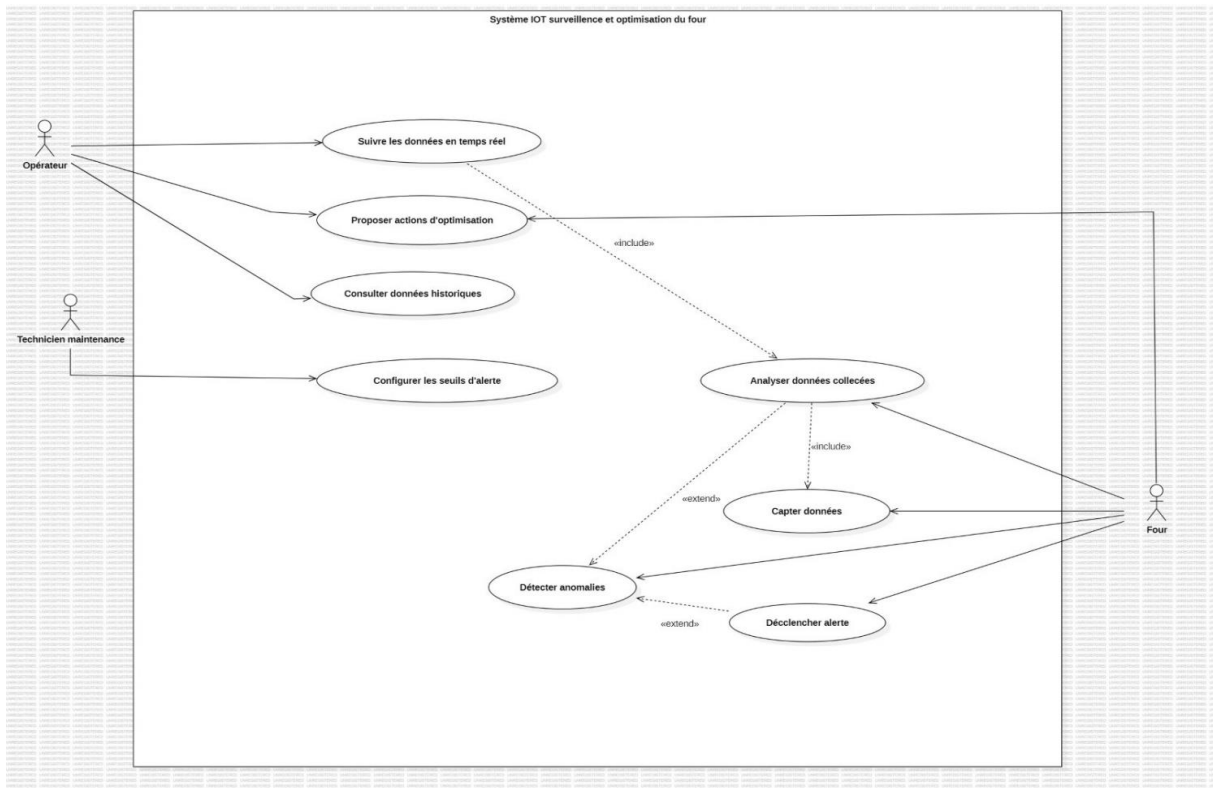


Figure 19 : Diagramme de cas d'utilisation

Ce diagramme représente un diagramme de cas d'utilisation pour un système IoT de surveillance et d'optimisation d'un four industriel. Il décrit les interactions entre les acteurs et les cas d'utilisation.

### 3.4.3 Identification des acteurs :

#### Opérateur :

- Suit les données en temps réel.
- Propose des actions d'optimisation.
- Consulte les données historiques.

#### Technicien maintenance :

- Configure les seuils d'alerte.

#### Four :

- Capte les données.
- Détecte les anomalies.
- Déclenche les alertes.

### 3.4.4 Identification des cas d'utilisation :

- ❖ **Suivre les données en temps réel** : L'opérateur consulte les données en direct provenant du four.
- ❖ **Proposer actions d'optimisation** : L'opérateur peut suggérer des améliorations pour optimiser le fonctionnement du four.
- ❖ **Consulter données historiques** : L'opérateur accède à l'historique des mesures collectées.
- ❖ **Configurer les seuils d'alerte** : Le technicien définit les limites au-delà desquelles une alerte doit être déclenchée.
- ❖ **Analyser données collectées** : Le système traite les données captées afin d'en extraire des informations utiles.
- ❖ **Capter données** : Le four envoie des mesures de température, consommation, etc. vers le système.
- ❖ **Détecter anomalies** : Le système identifie des comportements anormaux dans les données.
- ❖ **Déclencher alerte** : Le système émet une alerte si des anomalies sont détectées.

### 3.4.5 Relations entre cas d'utilisation :

#### «include» (includ) :

- Suivre les données en temps réel.
- Consulter données historiques et capter données incluent analyser données collectées.  
Cela signifie que l'analyse est une étape nécessaire à ces actions.

#### «extend» (étend) :

- Analyser données collectées peut étendre à détecter anomalies.
- Détecter anomalies peut étendre à déclencher alerte. Cela signifie que ces actions ne se produisent que dans certaines conditions (par exemple, si une anomalie est détectée).

### 3.4.6 Diagramme de classe :

Le diagramme de classe est donné par la figure (20) suivante :

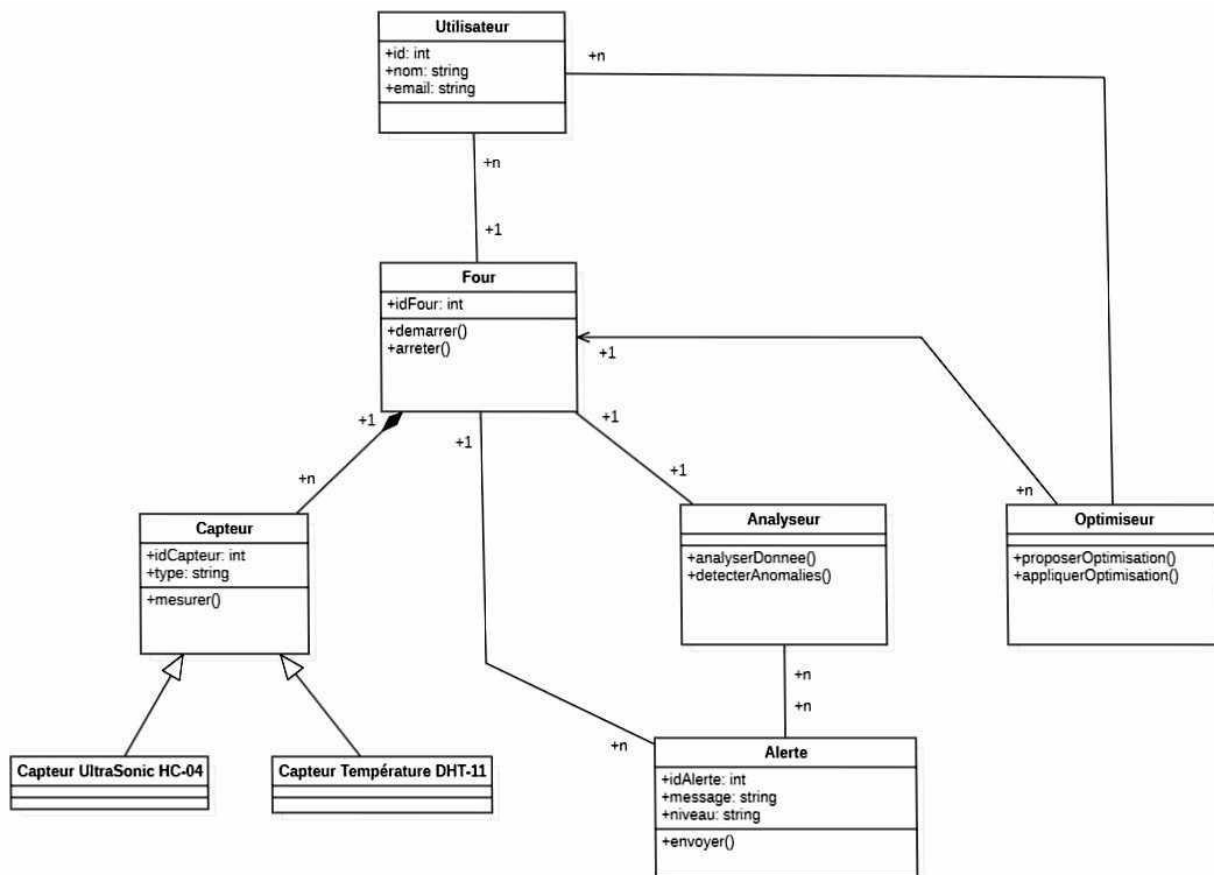


Figure 20 : Diagramme de classe

Le diagramme de classes présenté illustre la modélisation du système de surveillance et d'optimisation énergétique d'un four industriel. Ce système est composé de plusieurs entités interconnectées, chacune ayant un rôle spécifique. L'élément central est la classe `Four`, qui représente l'équipement industriel à surveiller. Ce four peut être démarré ou arrêté par l'intermédiaire des méthodes `demarrer()` et `arreter()`. Il est supervisé par un `Opérateur`, une entité humaine dotée d'un identifiant, d'un nom et d'un email, pouvant gérer plusieurs fours à la fois. Pour surveiller le bon fonctionnement du four, plusieurs `Capteurs` lui sont associés. Chaque capteur, identifié par un numéro et un type, a pour fonction de mesurer une donnée physique grâce à la méthode `mesurer()`. Une spécialisation de cette classe est le

capteur de température DHT-11, utilisé spécifiquement pour la mesure de la température dans le four.

Les données collectées par les capteurs sont transmises à un Analyseur, qui se charge de les traiter via les méthodes `analyserDonnee()` et `detecterAnomalies()`. Si des valeurs anormales sont détectées, des objets de type `Alerte` sont générés. Chaque alerte comporte un identifiant, un message explicatif et un niveau de gravité, et peut être envoyée à l'opérateur via la méthode `envoyer()`. En parallèle, un Optimiseur est également lié au four. Son rôle est d'améliorer l'efficacité énergétique du système en proposant des solutions via la méthode `proposerOptimisation()`, puis en les appliquant grâce à `appliquerOptimisation()`.

L'ensemble du système est donc conçu pour fonctionner de manière autonome et intelligente, en assurant à la fois la surveillance en temps réel, la détection précoce des anomalies, et l'optimisation continue des performances. Cette architecture orientée objet offre une base solide pour le développement d'un système IoT industriel évolutif, modulaire et efficace.

### 3.4.7 Diagramme de Séquence :

Le diagramme de séquence est donné par la figure (21) suivante :

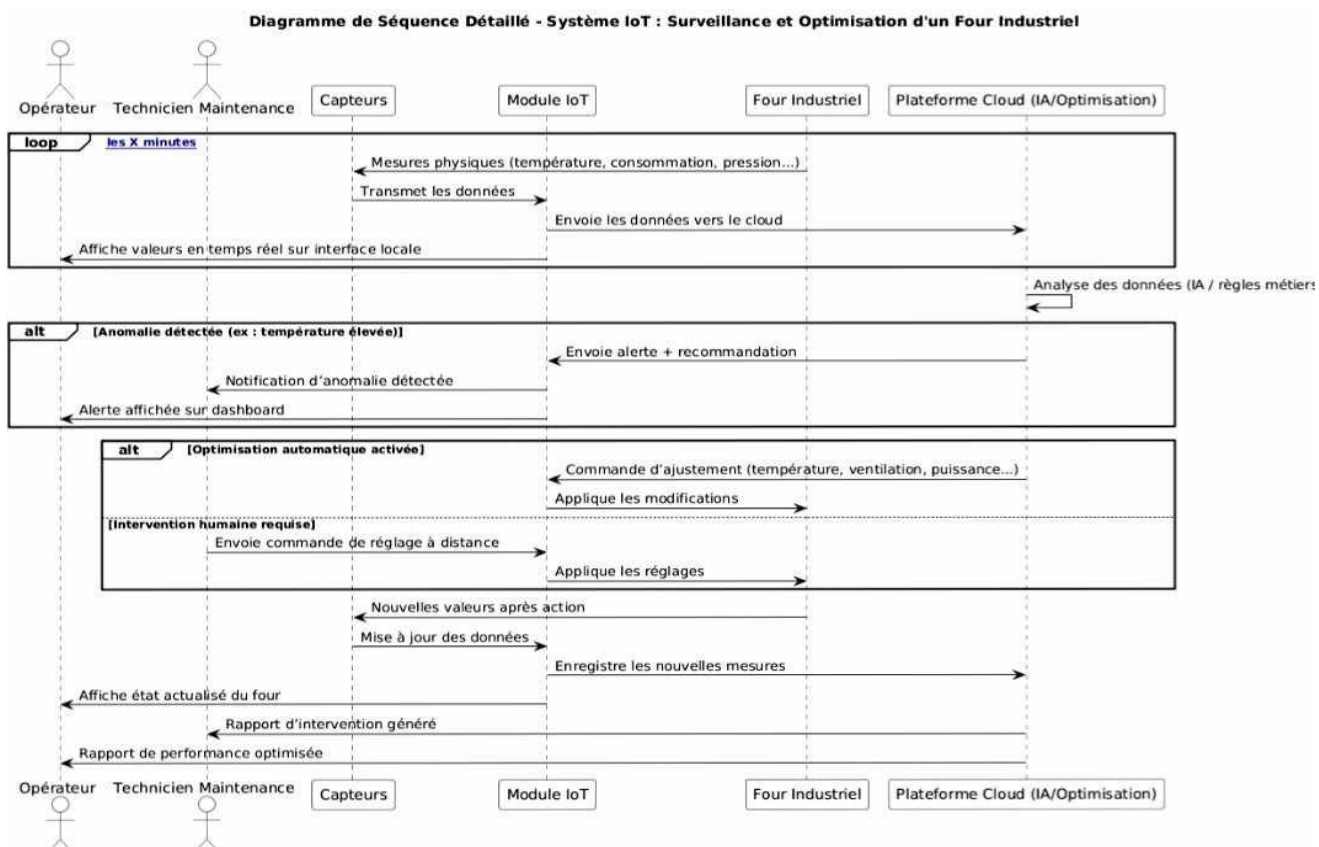


Figure 21 : Diagramme de séquence

Le diagramme de séquence présenté ci-dessous illustre les interactions temporelles entre les différentes entités impliquées dans le fonctionnement du système IoT destiné à la surveillance et à l'optimisation d'un four industriel.

Ce diagramme met en évidence les échanges entre les acteurs humains (opérateur et technicien de maintenance) et les composants techniques (capteurs, module IoT, four industriel et plateforme cloud), tout au long du processus de surveillance, de détection d'anomalies et d'optimisation.

### 3.4.8 Description détaillée des scénarios :

#### a) Surveillance cyclique des données

À intervalles réguliers (toutes les  $X$  minutes), les capteurs effectuent des mesures physiques (température, consommation énergétique, pression, etc.) au niveau du four.

Ces données sont ensuite :

- ❖ Transmises au module IoT pour un affichage en temps réel sur une interface locale accessible à l'opérateur.
- ❖ Envoyées vers la plateforme cloud pour stockage et analyse.

### **b) Détection d'anomalie (exemple : température élevée)**

Une fois les données reçues, la plateforme cloud applique des règles métiers ou des algorithmes d'intelligence artificielle pour analyser les comportements du four.

En cas de détection d'une anomalie (par exemple une température anormalement élevée) :

- ❖ Une alerte est générée avec une recommandation de correction.
- ❖ Une notification est envoyée au technicien de maintenance.
- ❖ L'alerte s'affiche automatiquement sur le tableau de bord local de l'opérateur.

### **c) Phase d'optimisation**

Deux scénarios d'optimisation sont envisageables selon la configuration du système :

#### ➤ **Optimisation automatique :**

La plateforme cloud envoie une commande d'ajustement des paramètres de fonctionnement du four (température, ventilation, puissance, etc.). Ces modifications sont appliquées automatiquement sans intervention humaine.

#### ➤ **Intervention humaine requise :**

- ❖ Le technicien envoie manuellement une commande de réglage à distance.
- ❖ Le four exécute ensuite ces nouvelles instructions.

### **d) Suivi, traçabilité et mise à jour**

À la suite de l'action corrective ou optimisatrice :

- ❖ Le four enregistre de nouvelles valeurs, qui sont à leur tour remontées via le module IoT.
- ❖ L'état du four est mis à jour sur l'interface.
- ❖ Un rapport d'intervention est généré pour le technicien.
- ❖ Un rapport de performance est également transmis à l'opérateur.

### 3.4.9 Diagramme d'activité :

Le diagramme d'activité est donné par la figure (22) suivante :

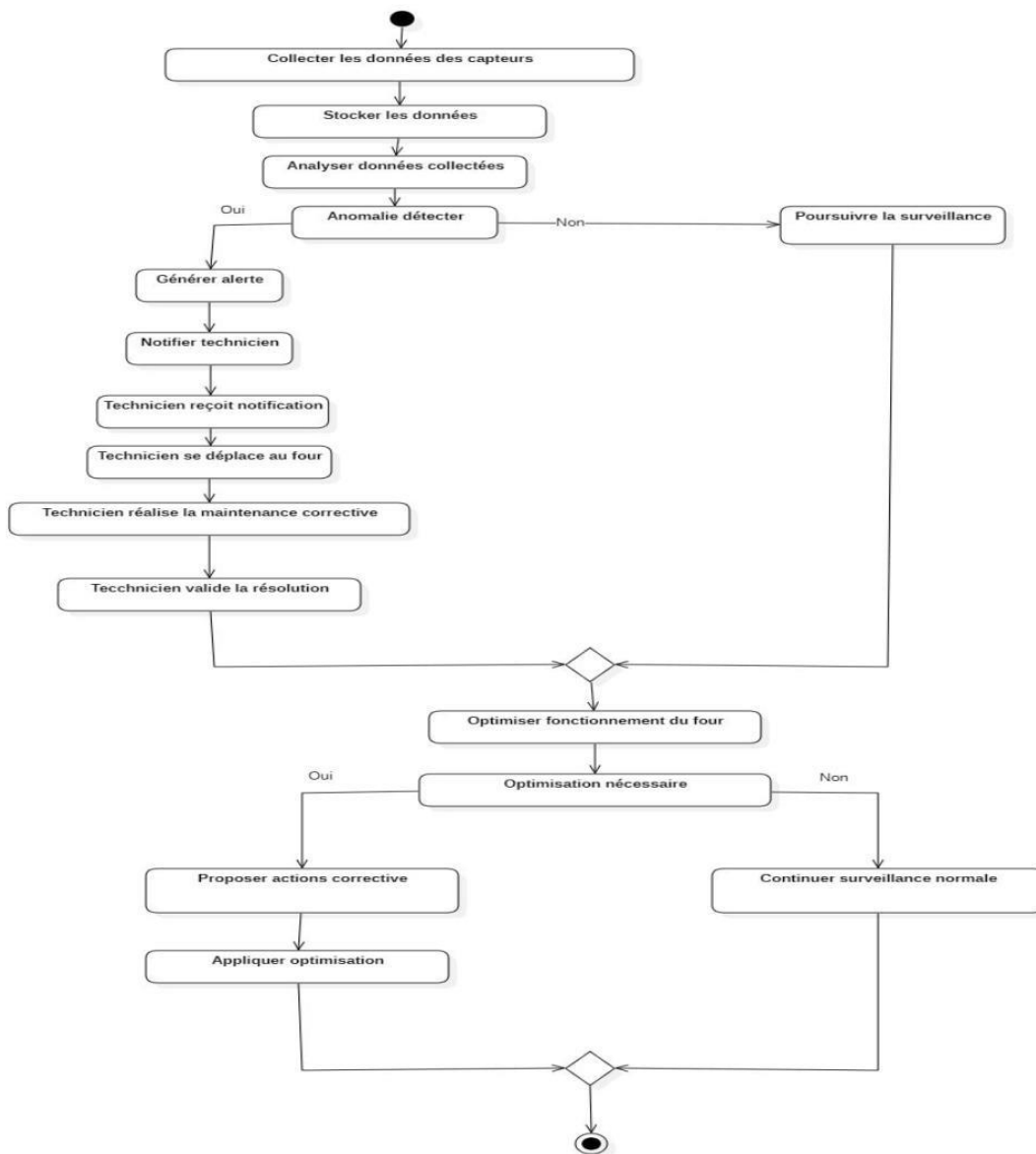


Figure 22 : Diagramme d'activité

Le diagramme d'activité ci-dessus modélise le processus global de surveillance, de détection des anomalies, de maintenance et d'optimisation du fonctionnement d'un four industriel dans un contexte IoT. Ce diagramme met en évidence la logique de traitement en fonction des événements détectés et des décisions prises.

### Étapes du processus :

- ❖ **Collecte et traitement initial des données** : Le système commence par la collecte continue des données issues des capteurs (température, pression, consommation énergétique, etc.), lesquelles sont ensuite stockées et analysées. Cette étape est cyclique et constitue la base du processus de surveillance.
- ❖ **Détection d'anomalie** : Après l'analyse, le système vérifie si une anomalie est détectée :
  - a. **Si aucune anomalie n'est présente**, la surveillance se poursuit normalement.
  - b. **Si une anomalie est détectée**, le système génère une alerte et envoie une notification au technicien de maintenance.
- ❖ **Intervention du technicien** : Le technicien reçoit la notification, se rend physiquement au niveau du four, effectue la maintenance corrective, puis valide la résolution du problème via l'interface.
- ❖ **Évaluation de l'optimisation** : Après correction de l'anomalie, le système évalue s'il est pertinent d'optimiser le fonctionnement du four :
  - a. **Si une optimisation est jugée nécessaire**, des actions correctives sont proposées, puis appliquées.
  - b. **Sinon**, la surveillance reprend son cycle normal.

### 3.5 Conclusion :

Nous avons présenté la modélisation du système IoT pour la surveillance et l'optimisation d'un four industriel. Grâce aux différents diagrammes (de classe, de séquence et d'activité), nous avons pu représenter les acteurs, les composants du système et leurs interactions. Ces schémas montrent comment les données sont collectées, analysées, et comment le système réagit en cas d'anomalie. La modélisation permet de mieux comprendre

le fonctionnement global et de préparer la mise en place du système. Elle facilite aussi la communication entre les différents intervenants du projet. Ce travail est une étape importante avant le développement pratique de la solution.

# **Chapitre 4 :**

# **Prototypage et**

# **Implémentation**

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la phase la plus concrète du projet, l'implémentation pratique et la réalisation du prototype fonctionnel du système de contrôle intelligent du four industriel. Après avoir défini les exigences fonctionnelles et techniques dans les chapitres précédents, cette partie présente le choix des composants électroniques, l'architecture matérielle adoptée, ainsi que la logique de programmation mise en œuvre à travers le microcontrôleur.

## 4.2 Étude de l'existant :

L'industrie mécanique, en particulier l'Entreprise Nationale des Matériels de Travaux, englobe une grande variété de domaines économiques. Elle intervient depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur distribution, en passant par la conception, la fabrication, le traitement des produits, leur commercialisation et leur utilisation. Dans ce secteur, la phase de conception d'un nouvel équipement correspond souvent à une reconception, c'est-à-dire une amélioration d'un produit déjà existant. Cette démarche vise à optimiser les performances ou l'adaptabilité du produit. Toutefois, les industries mécaniques sont souvent confrontées à des exigences techniques spécifiques et à des défis complexes pour mener à bien ces améliorations.

Par ailleurs, suite à nos recherches approfondies, nous avons choisi de prendre l'exemple de l'usine SOMATEL-ENMTP, dont les équipements présentent encore un niveau technologique proche de l'industrie 3.0. À travers ce travail de conception, notre objectif est d'accompagner cette entreprise dans sa transition vers un modèle plus moderne, en amorçant un passage progressif vers l'industrie 4.0, intégrant des technologies numériques avancées, des systèmes connectés et des solutions d'automatisation intelligentes.

Après avoir examiné l'ensemble des machines de l'usine, notre choix s'est porté sur un four industriel. Ce dernier est un dispositif utilisé pour élever la température d'un produit, et il peut remplir deux fonctions principales : soit servir exclusivement au chauffage (par exemple, le réchauffage de l'acier avant sa déformation plastique, ou du pétrole brut avant distillation), soit agir comme un réacteur à part entière dans lequel les produits sont élaborés (comme les fours de fusion du verre ou les fours de vapocraquage en pétrochimie).

Dans le contexte industriel de l'ENMTP, le four utilisé est un four de traitement thermique des métaux. Il est spécialement conçu pour effectuer des opérations de recuit, visant à réduire la dureté des pièces métalliques, augmenter leur ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes.

Selon l'étude que nous avons élaborée et d'après une recherche profonde, nous avons remarqué que le four industriel de l'entreprise ENMTP est un four très classique et basique comme illustre la figure (23).



Figure 23 : Four industriel de recuit de l'entreprise ENMTP

À sa base, il est construit avec des pierres afin de conserver et isoler la chaleur à l'intérieur. Il est constitué d'une seule porte mécanique qui s'ouvre et se ferme manuellement par l'employé. La source d'énergie qui fournit la chaleur dans ce four est l'électricité.

Le processus de réchauffement du four de recuit est résumé en cinq (5) étapes :

- Les pièces à réchauffé sont placées dans le four par l'employé chargé du processus.
- Cet employé ferme la porte manuellement.
- Il programme le four à une certaine température pour se réchauffer.
- Au moment où la durée est terminée, l'employé éteint le four manuellement.
- Ensuite, il se déplace vers la porte de ce four et l'ouvre. Après l'ouverture, il attend jusqu'au refroidissement de ce four, qui peut durer pendant des heures.

Au cours de ce processus, les employés rencontrent de grandes difficultés à cause du contact direct avec ce four. Dans des certains cas, ils peuvent subir différents et plusieurs risques majeurs, dont nous pouvons les résumer aux points suivants :

- Le risque de brûlures intenses dû au contact direct avec le four.
- Le risque d'explosion lors des températures très élevées, ce qui peut engendrer des décès ou des traumatismes.
- Le risque d'endommager les produits métalliques à l'intérieur du four.
- Le risque de perte de la matière première s'il y a un dépassement du temps nécessaire lors du réchauffement.

Par conséquent, l'absence de systèmes automatisés de surveillance et de contrôle expose l'équipement à des anomalies non détectées et à des risques d'usure prématurée ou de défaillance, compromettant ainsi la sécurité du personnel et la continuité de la production. Ces constats nous ont amenés à choisir ce four industriel comme cas d'étude, dans le but de développer une solution permettant la détection proactive des anomalies et la gestion des risques matériels.

### **4.3 Application de la conception :**

En milieu industriel, l'identification d'anomalies comme les dysfonctionnements ou les défaillances mécaniques est primordiale pour initier la maintenance prédictive. Cette dernière vise à prévoir les dysfonctionnements, les erreurs et les pannes potentielles. Elle offre aussi la possibilité d'améliorer la programmation des opérations de maintenance.

Avec l'avènement de l'Industrie 4.0, la maintenance prédictive se base sur des technologies sophistiquées telles que les systèmes cyber-physiques (CPS), l'internet des objets industriels (IIoT), le Cloud Computing et le Fog Computing. Ces technologies offrent

la possibilité de recueillir, d'analyser et d'utiliser en temps réel les données provenant des capteurs qui évaluent divers paramètres physiques de l'équipement, tels que la température, la tension ou les vibrations.

Dans l'industrie, peu importe la stratégie de maintenance prévisionnelle mise en place, un élément crucial persiste : la prévention des dangers et la sûreté des travailleurs. L'instauration de systèmes de détection d'anomalies offre non seulement la possibilité de prévoir les pannes et les dysfonctionnements éventuels, mais également de diminuer significativement les scénarios à risque pour les opérateurs.

Pour une société telle qu'ENMTP, il est impensable d'améliorer l'efficacité sans inclure une gestion stricte des risques industriels, en particulier dans des milieux de travail délicats tels que celui du four industriel. Effectivement, un système non supervisé peut se transformer en une source importante d'incidents, entraînant ainsi une augmentation de l'absentéisme par peur des pannes d'équipements. Cette absence a un impact négatif sur la productivité et entrave les initiatives d'amélioration continue.

Ainsi, le développement et l'intégration de solutions intelligentes de détection d'anomalies, combinées à une stratégie de prévention proactive, sont essentiels pour assurer à la fois la sécurité du personnel, la fiabilité des équipements et la durabilité du processus de production.

#### **4.4 Prototypage et implémentation :**

Nous avons pour objectif de modéliser un prototype intelligent de ce four industriel, intégrant des systèmes de détection d'anomalies et de gestion des risques matériels, afin d'améliorer la qualité de production et de fiabiliser l'équipement. Cette démarche vise à faire évoluer le four de la génération 1.0 vers la génération 4.0, à base de l'internet industriel des objets et du Fog Computing, en intégrant des technologies de surveillance en temps réel, capables d'anticiper les pannes et de prévenir les défaillances. Dans lequel nous suggérons un ensemble de capteurs et de contrôleurs : capteurs de température, capteurs de distances, un Servo moteur, et des LED rouge, jaune et vert. Ce prototype est illustré dans la figure (24) suivante.

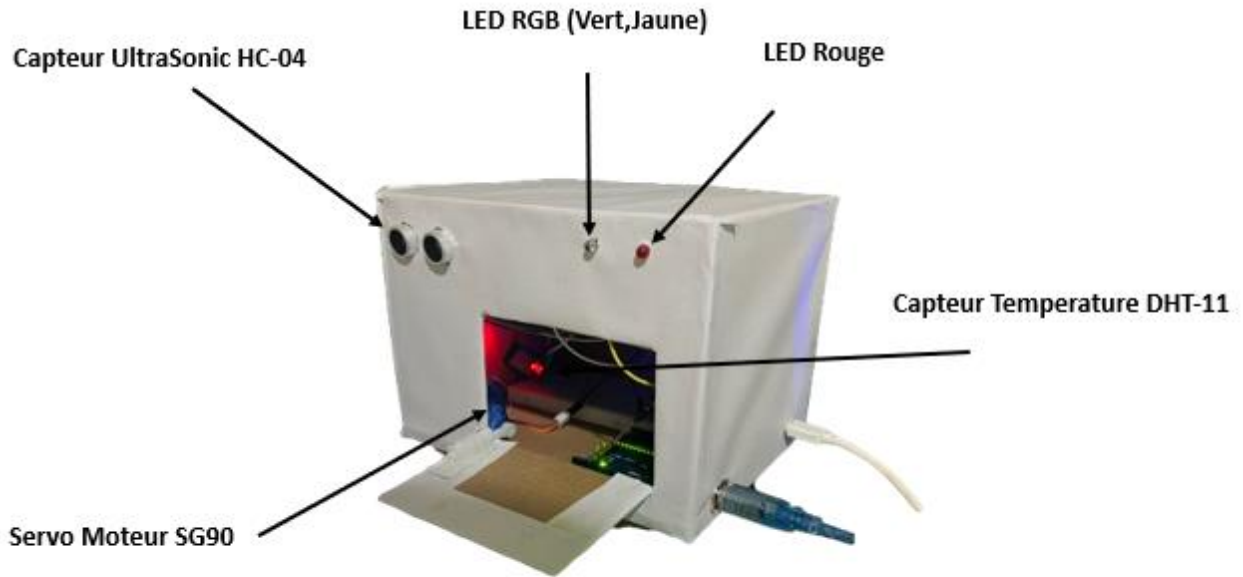


Figure 24 : Prototype du four 4.0

À long terme, cette approche pourra être généralisée à d'autres unités de production de l'entreprise, dans le but de répondre aux exigences croissantes de sécurité, d'efficacité et de maintenance prédictive de l'ENMTP.

#### 4.5 Modélisation d'un prototype du four 4.0 :

L'élaboration du four industriel 4.0 représente une étape cruciale vers une production intelligente, centrée sur la sécurité des opérateurs à l'intérieur de l'usine ENMTP. Cette modélisation, qui fait appel à des systèmes sophistiqués de repérage d'anomalies et de supervision en direct, facilite une gestion optimisée du processus de réchauffement, la prévention des dysfonctionnements et la diminution des risques associés à l'équipement. De plus, elle aide à améliorer les compétences technologiques des méthodes de production, tout en augmentant l'efficacité et en appuyant une approche proactive de maintenance prédictive et de sûreté industrielle.

Ce type de système permet aux employés d'éviter plusieurs problèmes et risques discutés dans la section précédente. Pour mieux comprendre le fonctionnement de ce système, nous décrivons le scénario suivant dans lequel ce système est utile :

Après avoir placé la matière première dans le four pour le réchauffement, l'opérateur utilise une application mobile pour fermer automatiquement la porte à distance, sans avoir besoin d'un contact physique direct avec l'équipement.

Grâce à cette interface mobile :

- L'opérateur peut surveiller la température en temps réel via un capteur intégré affichant les données dans l'application (voir figure 25).

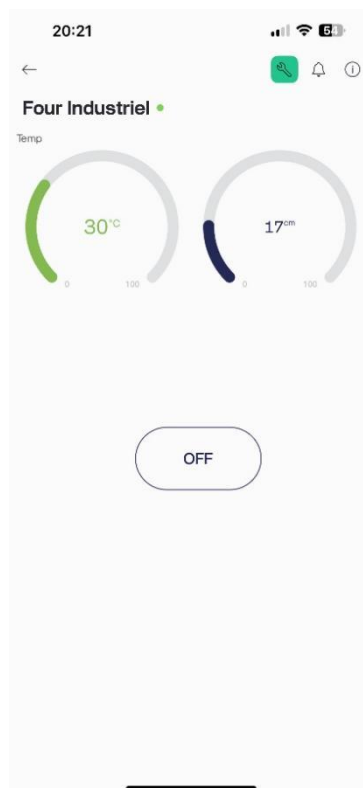


Figure 25 : Interface de l'application

Lorsque le système détecte que la température dépasse le seuil normal de fonctionnement, il passe automatiquement en mode de sécurité :

- Une lampe rouge clignote pour signaler un état critique.
- Un buzzer émet des bips sonores pour alerter les alentours.
- Le capteur de présence se déclenche pour vérifier s'il y a un employé devant le four.
- Une notification est envoyée pour informer que la température est élevée (voir figure 26).

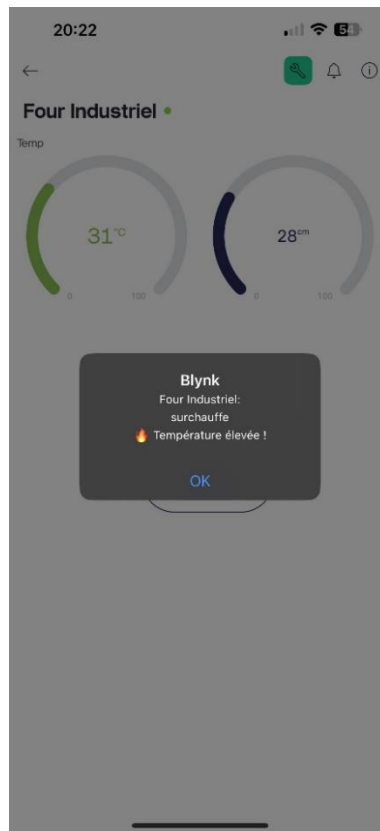


Figure 26 : Notification alerte

Le système réagit ensuite selon deux scénarios :

**Scénario 1 : Présence détectée devant le four**

Si un individu est détecté à proximité immédiate :

- Une lampe jaune s'allume pour signaler une obstruction.
- Le système empêche toute ouverture automatique de la porte afin d'éviter tout risque de blessure ou de brûlure (voir figure 27).



Figure 27 : Un individu a été détecté

### **Scénario 2 : Aucun individu détecté devant le four**

Si aucun obstacle n'est détecté :

- Une lampe verte s'allume pour signaler que la zone est dégagée.
- La porte du four s'ouvre automatiquement pour permettre un refroidissement contrôlé (voir figure 28).
- Une notification est envoyée pour informer que le four a été ouvert en toute sécurité (voir figure 29).

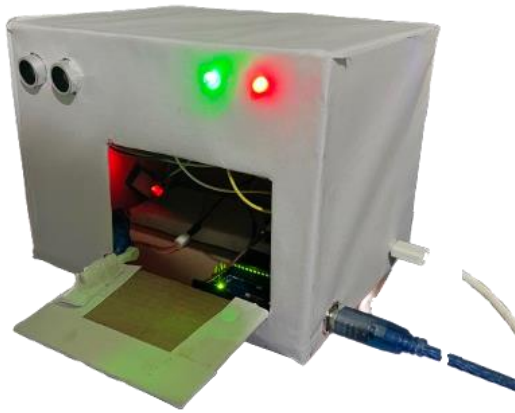


Figure 28 : La porte du four s'ouvre

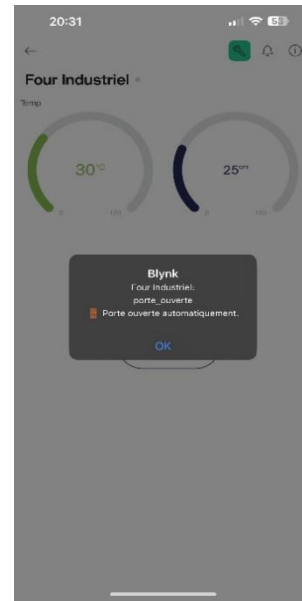


Figure 29 : Notification d'ouverture de la porte

Pendant toute cette phase :

- L'opérateur peut intervenir manuellement à tout moment via l'interrupteur virtuel de l'application, pour ouvrir ou fermer la porte sans dépendre des conditions du système (voir figure 30).

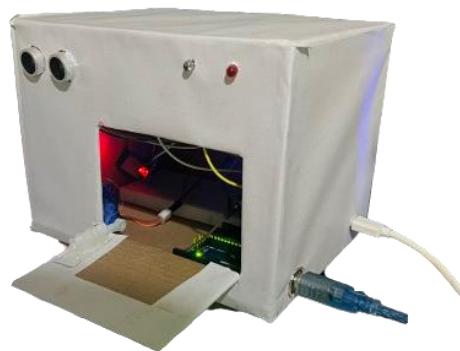


Figure 30 : Ouverture et fermeture manuelle

- Le capteur de présence fonctionne en mode lecture continue, mais n'autorise des actions que dans les phases critiques, garantissant une sécurité optimale.

- Une fois que la température revient à un niveau de fonctionnement stable, tous les éléments d’alerte (buzzer, LED rouge) sont désactivés automatiquement, et la porte peut être refermée automatiquement si nécessaire.

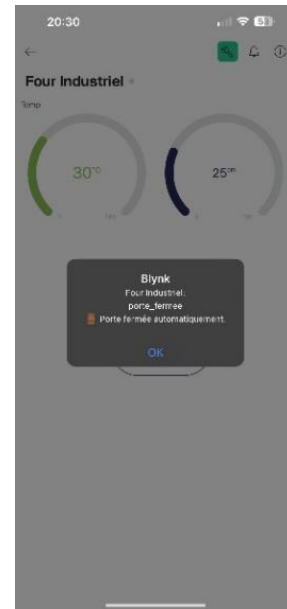


Figure 31 : Notification de fermeture

Figure 32 : Fermeture automatique de la porte

## 4.6 Environnements de développement :

Nous allons présenter dans cette section l’ensemble des différents outils logiciels et matériels nécessaires, afin de réaliser notre prototype modélisé dans la section précédente.

### 4.6.1 Plateformes :

Dans la partie suivante nous présentons les plateformes et les langages de programmation utilisés :

**C++ :** C’est un langage de programmation à usage général créé par Bjarne Stroustrup comme une extension du langage de programmation C, ou "C avec classes". Le langage s'est considérablement développé au fil du temps, et le C++ moderne possède désormais des fonctionnalités orientées objet, génériques et fonctionnelles, en plus des facilités de manipulation de la mémoire de bas niveau.

Il est presque toujours implémenté en tant que langage compilé [31].



Figure 33 : Langage C++

**Arduino IDE:** L'environnement de développement intégré (IDE) Arduino est une application multiplateforme (pour Windows, MacOS, Linux) qui est écrite en fonctions de C et C++. Il est utilisé pour écrire et télécharger des programmes sur les cartes compatibles Arduino. Mais aussi, à l'aide de noyaux externes, sur les cartes de développement d'autres fournisseurs [32].

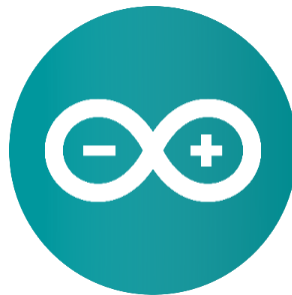


Figure 34 : Arduino

**Blynk :** Blynk est une plateforme IoT (Internet of Things) low-code conçue pour permettre aux développeurs et aux entreprises de connecter, contrôler et superviser des objets physiques via des applications mobiles et des dashboards web, sans besoin de coder l'interface utilisateur[39].



Figure 35 : Blynk

#### 4.6.2 Equipements utilisés :

Dans la partie suivante nous présentons les dispositifs électroniques utilisés :

**Arduino NodeMCU** : NodeMCU est un modèle de cartes de prototypage open source contient un micrologiciel open source. Le nom "NodeMCU" combine "node" et "MCU" (unité de microcontrôleur), le terme "NodeMCU" se réfère strictement au micrologiciel plutôt qu'aux kits de développement associés [33].



Figure 36 : Arduino NodeMCU

**Servo moteur 120 degré** : Les servomoteurs, souvent abrégés en « servo » tout court par leurs utilisateurs, sont des moteurs d'un type particulier, très appréciés pour faire tourner quelque chose jusqu'à une position bien précise et capable de maintenir cette position jusqu'à l'arrivée d'une nouvelle instruction. Ils sont très utilisés dans le modélisme (direction des voitures télécommandées, commande des gouvernes de dérive et de profondeur sur les avions, etc.), mais ont aussi leur place dans la robotique et l'industrie par exemple dans des vannes pour réguler des flux de liquides [34].



Figure 37 : Servo Moteur

**Capteur Ultrasonique** : est un dispositif électronique qui mesure la distance d'un objet cible en émettant des ondes sonores ultrasoniques et qui convertit le son reflété en un signal électrique [35].



Figure 38 : Capteur Ultrasonique

**Capteur de température** : est un dispositif électronique qui mesure la température de son environnement et convertit les données d'entrée en données électroniques pour enregistrer, surveiller ou signaler les changements de température [36].

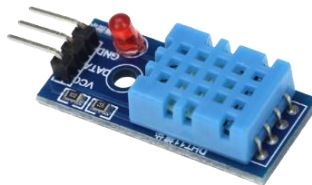


Figure 39 : Capteur de température

**LED** : est une unité d'éclairage électrique qui produit de la lumière à l'aide de diodes électroluminescentes (DEL) [37].



Figure 40 : LED

**Buzzer** : est un composant utilisé pour générer du son. C'est un composant numérique qui peut être connecté à des sorties numériques [38].



Figure 41 : Buzzer

## 4.7 Conclusion

Les résultats obtenus à travers les tests ont montré que le système est fiable, flexible, et offre un niveau de sécurité satisfaisant pour les utilisateurs. Cette implémentation ouvre la voie à plusieurs perspectives d'amélioration, notamment l'intégration de modules de stockage de données, de systèmes de ventilation automatisés, ou encore d'alertes par SMS ou e-mail. Le prototype constitue ainsi une base solide pour un futur développement industriel ou académique plus poussé.

## Conclusion Générale

Ce mémoire s'inscrit dans une dynamique d'innovation industrielle, en explorant le développement d'un système basé sur l'Internet des Objets (IoT) pour surveiller et optimiser la consommation énergétique d'un four industriel. À travers la mise en œuvre de capteurs intelligents, d'outils d'analyse de données, de traitement distribué via le Cloud et le Fog Computing, ainsi que de mécanismes d'alerte et d'optimisation, ce travail a démontré la pertinence des technologies IoT dans la modernisation des processus industriels.

Le système proposé vise à améliorer l'efficacité énergétique, à anticiper les anomalies, et à renforcer la fiabilité des opérations sans intervention humaine constante. Cette approche contribue pleinement aux objectifs de l'Industrie 4.0, en rendant les installations plus intelligentes, connectées et respectueuses de l'environnement.

Toutefois, ce projet reste une première étape vers une solution complète. Il n'a pas encore été validé en conditions réelles, et certains aspects comme la sécurité des données, l'interopérabilité avec d'autres systèmes industriels, ou encore l'intégration de tableaux de bord décisionnels évolués mériteraient d'être approfondis.

Pour les perspectives futures, il serait intéressant de développer une application mobile pour un contrôle à distance, d'ajouter des modules d'intelligence artificielle plus avancés pour une optimisation autonome, ou encore d'étendre le système à plusieurs types d'équipements industriels. Ainsi, ce travail ouvre la voie à de nouvelles recherches et à des applications concrètes qui contribueront à rendre l'industrie plus performante, plus durable et plus intelligente.

## Références

- [1] What is Internet of Things (IoT)?, SAP Technology Platform, [En ligne] 2025. <https://www.sap.com/france/products/technology-platform/what-is-iot.html>
- [2] Friendly Technologies, *A Brief History of IoT*, Friendly-Tech, [En ligne] juillet 2022. <https://friendly-tech.com/a-brief-history-of-iot/>
- [3] HQSoftware Lab, *The History of IoT: A Comprehensive Timeline of Major Events (Infographic)*, [En ligne] mars 2025. <https://hqsoftwarelab.com/blog/the-history-of-iot-a-comprehensive-timeline-of-major-events-infographic/>
- [4] DDruid, *Capteurs IoT*, ddruid.io, [En ligne] 3 Septembre 2023. <https://ddruid.io/capteurs-iot/>
- [5] Dati-Plus, *Protocole IoT*, [En ligne] mai 2025. <https://dati-plus.com/protocole-iot/>
- [6] Wikipédia, "Réseau de capteurs sans fil," Wikipédia, [En ligne] 14-Nov-2024. [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau\\_de\\_capteurs\\_sans\\_fil](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_de_capteurs_sans_fil)
- [7] DatiPlus, "IoT Architecture: Comment est construit un réseau IoT ?", [En ligne] juillet 2024. <https://dati-plus.com/iot-architecture/>
- [8] D. Crocq, "Cloud Computing: Quels Avantages et Inconvénients pour les Entreprises ?", ITTA Blog, [En ligne] 15 novembre 2024. <https://www.itta.net/blog/cloud-computing-quels-avantages-et-inconvenients-pour-les-entreprises/>
- [9] Google Cloud, "PaaS vs IaaS vs SaaS : Quel est le modèle adapté ?", [En ligne] 15 mars 2025. <https://cloud.google.com/learn/paas-vs-iaas-vs-saas?hl=fr>
- [10] Y. G., "Cloud Computing – SaaS, IaaS, et PaaS : Définitions et différences!", [En ligne] 19 mai 2022. <https://everwin.fr/cloud-computing-saas-iaas-paas/>
- [11] Salesforce, Trailhead, [En ligne]. Mars 2025. <https://trailhead.salesforce.com/>.
- [12] Gour, Rinu. 9 Major Characteristics of Cloud Computing. dzone. [En ligne] 23 janvier 2019. <https://dzone.com/>.
- [13] Wikipédia, « Fog computing », [En ligne] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fog\\_computing](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fog_computing)
- [14] Linthicum, David. cloud computing "When to use a fog computing node". infoworld.com. [En ligne] 21 JUL 2020. <https://www.infoworld.com/article/3567434/when-to-use-a-fog-computing-node.html>.
- [15] jose.CA, San. "Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are". [En ligne] 2015. <https://www.cisco.com/>.

- [16] Wikimedia Foundation, Fourth Industrial Revolution, article “Fourth Industrial Revolution” sur Wikipédia (juin 2025).
- [17] Sean Baker. The ultimate guide to Industry 4.0 [En ligne] April 4, 2025.
- [18] W. Patrick Neumann, Sven Winkelhaus. International Journal of Production Economics January 2021
- [19] Ray Y. Zhong, Eberhard Klotz, Stephen T. Newman. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0 [En ligne] October 2017.
- [20] **Lu, Y., & Xu, X. (2019).** *Industry 4.0 and Industrial Internet of Things: A systematic literature review and research agenda.*
- [21] Aceto, G., Persico, V., & Pescapé, A. (2020). *Industry 4.0 and Health: Internet of Things, Big Data, and AI for Healthcare.* Journal of Industrial Information Integration, 18, 100129.
- [22] Topol, E. (2019). *Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again.*
- [23] Future Internet (2019), *How Digital Transformation Affects the Patient Journey*
- [24] Sharma & Bahl (2020), IEEE Access ; Accenture (2020)
- [25] Ghosh et al. (2019), IEEE IoT Journal ; Siemens Smart Office (2021)
- [26] Vincent, “Maison intelligente : Définition, Fonctionnement et Avantages”, Consofutur, [En ligne] 18 juillet 2024. <https://www.consofutur.com/maison-intelligente-8817/>
- [27] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.* Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
- [28] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- [29] Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497–1516.
- [30] Opensenmedia, “Le langage de Modélisation UML ?”, [En ligne] juin 2022. <https://opensenmedia.com/le-langage-de-modelisation-uml/>
- [31] Stroustrup, Bjarne. The C++ Programming Language. ISBN 0-201-88954-4. OCLC 59193992 1997.
- [32] Arduino IDE. Wikipedia. [En ligne] 20 April 2024.

- [33] wikipedia. NodeMCU. [En ligne] 27 May 2025. <https://en.wikipedia.org/wiki/NodeMCU>
- [34] Developpez.com, “Projet 12 : utiliser un servomoteur,” Arduino à l’école, [En ligne] février 2019. <https://arduino.developpez.com/tutoriels/arduinoa-l-ecole/?page=projet-12-utiliser-un-servomoteur>.
- [35] Danny Jost. What is an Ultrasonic Sensor? fierceelectronics. [En ligne] 7 Oct2024. <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-ultrasonicsensor>
- [36] Jost, Danny. What is a temperature sensor? fierceelectronics. [En ligne] 2 Jul2024 . <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-a-temperature-sensor>
- [37] LED lamp. wikipediz. [En ligne] 8 may 2025. [https://en.wikipedia.org/wiki/LED\\_lamp](https://en.wikipedia.org/wiki/LED_lamp)
- [38] The Buzzer. Sensorkit. [En ligne] 8 june2025 <https://sensorkit.arduino.cc/sensorkit/module/lessons/lesson/04-the-buzzer>
- [39] Blynk, “Blynk IoT Platform Overview,” GitBook, [En ligne] Mai 2025. <https://docs.blynk.io/en>