

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



**Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique**  
**Département de Mathématiques et informatique**  
**Filière : Informatique**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Informatique

Option : **Réseaux et Systèmes**

Présenté par :

**Chaouch Zineb Malek**

**Tayeb bey Nour El houda**

THEME :

**L'intégration de la technologie IIoT dans un  
processus PLM**

**Encadrant(e) :** Dr. Laredj Mohamed Adnane.

Dr. Abid Meriem.

Année Universitaire 2022-2023

# Remerciements

**N**ous commençons par remercier le dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, l'amour du savoir et surtout la patience pour pouvoir produire ce modeste travail.

**C**e travail n'aurait pu aboutir sans une réelle collaboration et un échange d'idées entre tous ceux qui y ont participé ; nous tenons ici à les remercier.

**N**os vifs remerciements s'adressent, en premier lieu, à **Mr Laredj Adnane** et **Mme Abid Meriem**, nous tenons à leur exprimer toute notre reconnaissance pour leur encadrement, leurs précieux conseils, leur soutien constant, leur confiance et leur patience, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et leurs contributions considérables tout au long de la réalisation de ce travail. Nous avons eu l'honneur et le plaisir de travailler sous leur direction pendant notre projet de Master.

**N**ous aimerions également remercier l'équipe du complexe **GP1Z**, En particulier **Mr Ben Ameer** et **Mr Guedda**, pour leur accueil chaleureux, leurs orientations et le temps qu'ils nous ont consacré afin de nous fournir toutes les informations nécessaires pour la réalisation de ce projet.

**N**ous exprimons notre gratitude à tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail.

**N**ous ne pourrions terminer ces remerciements sans y associer nos collègues et nos amis.

**A** toutes et à tous nous leurs disons **merci**.

# *Dédicaces*

*C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.*

*C'est avec une profonde gratitude et de sincères mots que je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers.*

*À ma très chère mère, qui a toujours été présente pour moi dans les moments les plus difficiles, et qui veille sans cesse sur moi avec ses prières. Je lui suis reconnaissante pour ses grands sacrifices et tout l'amour qu'elle me porte.*

*À mon très cher père, pour les efforts qu'il a fournis pour mon éducation, sa patience et sa confiance en moi, ainsi que son dévouement à mon bonheur. Que Dieu me les garde.*

*A mes chères sœurs Amina, Salsabil et Israa, votre soutien a été d'une grande importance. Merci beaucoup.*

*À ma grand-mère et à mon grand-père, que j'aime beaucoup, et qui m'ont toujours encouragée et soutenue.*

*À ma chère binôme Chaouch Zineb Malek, Qui a trouvé la patience de me supporter et de m'encourager tout au long de ce mémoire, ainsi qu'à sa famille.*

*À mes chères amies Hadjar, Faiza et Sarah, Qui m'ont soutenue et encouragée en tous les moments.*

*À tous les honorables enseignants qui ont contribué à mon travail. À toute la promotion informatique 2022/2023. À tous ceux qui m'aiment. À tous ceux que j'aime.*

Nour El Houda.

# *Dédicaces*

*Je dédie nôtre mémoire :*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, m'avie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*A mes sœurs Ikram et khouloud,*

*A mon petit frère Makhlouf,*

*A mes oncles Bachir, Djamel, Abdallah et Rachid*

*A ma chère binôme Nour El Houda,  
Pour son entente, soutient, sa sympathie et sa patience durant ces années d'études.*

*A mes proches ami(e)s : Hadjar, Faiza, Sarah.  
En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude et la promotion réseaux et systèmes.*

**Zineb Malek.**

## Résumé

La gestion du cycle de vie des produits (PLM) est devenue importante dans les entreprises pour gérer les données, les connaissances et toutes les informations tout au long du cycle de vie des produits.

Dans notre travail, nous proposons une approche basée spécifiquement sur la maintenance des outils de production, qui constitue une partie essentielle du cycle de vie d'un produit. Notre étude se concentre sur l'intégration des données IIoT dans un système de gestion du cycle de vie d'un produit, en particulier sur la maintenance. L'objectif est d'aider les entreprises à prendre des décisions éclairées et efficaces pour améliorer la fiabilité opérationnelle et réduire les coûts de maintenance.

Nous avons choisi la maintenance préventive d'un compresseur de gaz butane comme étude de cas en raison de sa criticité dans le processus de production et des risques potentiels liés à son dysfonctionnement.

Notre contribution à cette problématique consiste à utiliser la plateforme PLM OpenBom pour intégrer les données IIoT provenant des capteurs installés sur le compresseur. Cela nous a permis d'analyser de manière plus efficace les informations relatives à la maintenance préventive.

**Mots-clés :** PLM, IoT, IIoT, RCSF, Cycle de vie d'un produit, L'industrie, La maintenance, L'intégration de l'IIoT et du PLM, OpenBom, Compresseur de butane, Arduino, Dht11, PLX-DAQ, Collecte de données, Capteur, maintenance préventive.

## **Abstract**

Product lifecycle management (PLM) has become important in companies to manage data, knowledge and all information throughout the product lifecycle.

In our work, we propose an approach based specifically on the maintenance of production tools, which constitutes an essential part of the life cycle of a product. Our study focuses on the integration of IIoT data into a product lifecycle management system, particularly on maintenance. The goal is to help companies make informed and effective decisions to improve operational reliability and reduce maintenance costs.

We have chosen the preventive maintenance of a butane gas compressor as a case study because of its criticality in the production process and the potential risks associated with its malfunction.

Our contribution to this problem is to use the OpenBom PLM platform to integrate IIoT data from sensors installed on the compressor. This has allowed us to more effectively analyze preventive maintenance information.

**Keywords:** PLM, IoT, IIoT, RCSF, Product life cycle, Industry, Maintenance, Integration of IoT and PLM in industry, OpenBom, Butane compressor, Arduino, Dht11, PLX-DAQ, Data collection, Sensor, preventive maintenance.

## Liste des figures

Figure N°	Titre de la figure	Page
Figure 1.1	Phases du cycle de vie du produit	8
Figure 1.2	Le PLM est holistique	9
Figure 1.3	Les origines du PLM	10
Figure 1.4	Composants de base des outils de gestion du cycle de vie des produits	12
Figure 1.5	Structuration des données dans un SGDT	13
Figure 1.6	Notion multipoints de vue sur le produit	14
Figure 1.7	Modèle Workflow de lancement d'un produit	14
Figure 1.8	Modèle Produit et Modèle de processus	15
Figure 1.9	Système PLM et applications métier	16
Figure 1.10	Modèle pour les opération BOL utilisant les informations MOL et EOL	17
Figure 1.11	Modèle pour les opérations MOL utilisant les informations BOL et EOL	18
Figure 1.12	Modèle pour les opérations EOL utilisant les informations BOL et MOL	18
Figure 2.1	L'internet des objets	22
Figure 2.2	Domaines d'application de l'IoT	23
Figure 2.3	L'architecture de base de l'IoT	27
Figure 2.4	Évolution de l'industrie	31
Figure 3.1	Types de maintenance	37
Figure 3.2	IoT avec un système PLM	42
Figure 3.3	Un concept de système pour l'intégration de l'IoT et du PLM	44
Figure 4.1	System de contrôle du compresseur butane GP1Z	50
Figure 4.2	Compresseur de butane dans GP1Z	52
Figure 4.3	Capteur de Vibration du compresseur	53
Figure 4.4	Capteur de Température du compresseur	53
Figure 4.5	La plateforme OpenBom	54
Figure 4.6	Formule d'abonnement OpenBOM	55
Figure 4.7	Connexion à OpenBom	56

Figure 4.8	Structure du compresseur dans OpenBOM	58
Figure 4.9	Données IIoT du compresseur de butane GP1Z	59
Figure 4.10	Les mesures de température et de vibrations liées au moteur	60
Figure 4.11	Code d'intégration des données IIoT dans OpenBOM	62
Figure 4.12	Plateforme OpenBom automatisée	63
Figure 4.13	Des données IIoT dans OpenBom PLM	63
Figure 4.14	Les niveaux de communication GP1/Z	64
Figure 4.15	Carte Arduino UNO	66
Figure 4.16	Les composants de la carte Arduino UNO	66
Figure 4.17	Capteur DHT11	67
Figure 4.18	Les Résistances Arduino	68
Figure 4.19	Logiciel Arduino IDE	69
Figure 4.20	Le logiciel PLX-DAQ	70
Figure 4.21	Connexion de capteur DHT11 avec la carte Arduino UNO	71
Figure 4.22	Notre branchement du capteur DHT11 avec Arduino	72
Figure 4.23	Paramétrage de la carte -Type de carte	72
Figure 4.24	Paramétrage de la carte -Numéro de port USB	73
Figure 4.25	Paramétrage de la carte -Numéro de baud	73
Figure 4.26	Programme de lecture et d'écriture des données du capteur DTH11	74
Figure 4.27	Paramétrage de PLX-DAQ (Débit en bauds)	75
Figure 4.28	Paramétrage de PLX-DAQ (Numéro de port USB)	75
Figure 4.29	Enregistrement des données à l'aide du PLX-DAQ Excel	75



## Liste des tableaux

Tableau N°	Titre du tableau	Page
Tableau1	Tableau comparatif des logiciels de PLM	19
Tableau2	Les composants de base d'un système IoT	26
Tableau3	Les étapes et les technologies pour la mise en place de l'IoT	29
Tableau4	Caractéristiques clés du complexe GP1/Z	49
Tableau5	Les seuils des capteurs du compresseur GP1/Z	54
Tableau6	Branchement du capteur DHT11 avec Arduino	71

## Liste des abréviations

Abréviation	Expression Complète
BOL	Beginning of Life
MOL	Middle of Life
EOL	End of Life
PLM	Product Lifecycle Management
CAD	Computer Aided Design
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
PDM	Product Data Management
ERP	Enterprise Ressource Planning
CRM	Customer Relationship Management
SCM	Supply Chain Management
SGDT	Système de gestion de données techniques
FAO	Fabrication Assistées par Ordinateur
KBE	Knowledge based engineering
SCM	Supply Chain Management
BOM	Bill of materials
POC	Product Operational Cycle
UIT	Union Internationale des Télécommunications
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
RFID	Radio frequency identification
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
DDS	Data Distribution Service
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
LQS	Liquéfaction et Séparation des Gaz

DCS	Distributed Control system
MCR	Main Control Room
LCR	Local Control Room
CCR	Camion Control Room
MCAD	Mechanical Computer-Aided Design
ECAD	Electronic Computer-Aided Design
PWM	Pulse With Modulation
IDE	Integrated Development Environnent
PLX-DAQ	Parallax Data Acquisition

# Table de matière

Introduction générale.....	5
Chapitre 1 .....	7
Gestion du cycle de vie d'un produit .....	7
(PLM).....	7
1.1 Introduction .....	7
1.2 Cycle de vie d'un produit.....	7
1.2.1 Les phases du cycle de vie du produit.....	7
1.2.1.1 Début de vie (Beginning of Life -BOL) : .....	8
1.2.1.2 Milieu de vie (Middle of Life -MOL) :.....	8
1.2.1.3 Fin de vie (End of Life -EOL) : .....	9
1.3 Qu'est-ce que le PLM ? .....	9
1.4 L'évolution du PLM .....	10
1.5 Pourquoi le PLM est-il utilisé ? .....	11
1.6 Les fonctions de base du PLM .....	11
1.6.1 Gestion des données .....	12
1.6.1.1 Structure d'un produit .....	12
1.6.1.2 Aspect multipoint de vue .....	13
1.6.2 Gestion des processus et workflow .....	14
1.6.3 Gestion de projet .....	15
1.6.4 Intégration d'applications .....	15
1.7 Le rôle du PLM dans l'industrie .....	16
1.7.1 PLM en phase BOL (Beginning of Life) .....	16
1.7.2 PLM dans les phases MOL (Middle of Life) et EOL (End Of .....	17
Life).....	17
1.8 Quelques logicielles PLM .....	18
1.9 Conclusion.....	20
Chapitre 2 .....	21
L'Internet des Objets (IoT) .....	21
2.1 Introduction .....	21
2.2 L'internet des objets (IoT) .....	21
2.2.1 Un objet connecté.....	21
2.2.2 Définition de IoT .....	21

2.2.3 Les réseaux de capteurs sans fil et IoT.....	22
2.2.4 Domaines d'application de l'IoT.....	23
2.2.4.1 La vie intelligente (Smart Living) :.....	23
2.2.4.2 Les villes intelligentes (Smart Cities) :.....	24
2.2.4.3 Les maisons intelligentes (Smart Homes) :.....	24
2.2.4.4 La santé intelligente (Smart Health) :.....	24
2.2.4.5 Le transport Intelligent (Smart Transport) :.....	24
2.2.4.6 L'énergie intelligente (Smart Energy) :.....	25
2.2.4.7 L'agriculture intelligente (Smart Agriculture) :.....	25
2.2.4.8 L'industrie intelligente (Smart Industry) :.....	25
2.2.5 Les Composants De L'IoT .....	26
2.2.6 Architecture de l'Internet des objets .....	27
2.2.6.1 Couche de perception :.....	28
2.2.6.2 Couche réseau :.....	28
2.2.6.3 Couche middleware :.....	28
2.2.6.4 Couche d'application :.....	28
2.2.6.5 Couche métier :.....	29
2.2.7 Les étapes pour la mise en place de l'IoT .....	29
2.2.8 Les avantage de l'internet des objets (IoT).....	30
2.3 L'Internet des Objets dans l'industrie (IIoT) :.....	31
2.3.1 Quelques applications de l'IIOT .....	32
2.3.1.1 Gestion de l'énergie .....	32
2.3.1.2 Maintenances préventives .....	32
2.3.1.3 Automatisation .....	33
2.3.2 Les défis de l'IIoT.....	33
2.4 Conclusion.....	34
Chapitre 3.....	35
Intégration de l'IIoT et du PLM dans l'industrie .....	35
3.1 Introduction.....	35
3.2 Définition de la maintenance.....	35
3.2.1 Les objectifs de la maintenance .....	36
3.2.2 Types de maintenance .....	37
3.2.2.1 Maintenance corrective .....	37
3.2.2.1.1 Maintenance palliative (dépannage).....	38
3.2.2.1.2 Maintenance curative (réparation) .....	38
3.2.2.2 Maintenance préventive .....	38
3.2.2.2.1 Maintenance systématique .....	38

3.2.2.2.2	Maintenance conditionnelle .....	39
3.2.2.2.3	Maintenance prévisionnelle ou prédictive.....	39
3.3	Un aperçu des recherches actuelles sur Intégration de l'IoT et du PLM.....	40
3.4	Système PLM basé sur L'IoT .....	41
3.4.1	Optimisation de la prise de décision de maintenance en temps réel grâce à l'intégration de l'IoT et du PLM .....	43
3.4.2	Planification de maintenance basée sur l'intégration de l'IIoT et du PLM .....	43
3.5.	Stratégies d'intégration de l'IIoT dans la gestion de la maintenance du PLM .....	45
3.5.1	Capteurs de surveillance des équipements .....	45
3.5.2	Connectivité des équipements .....	45
3.5.3	Analyse des données en temps réel .....	45
3.5.4	Intégration avec le système PLM .....	45
3.5.5	Optimisation des processus de maintenance .....	46
3.5.6	Maintenance préventive basée sur les données .....	46
3.5.7	Gestion des équipements.....	46
3.5.8	Gestion des stocks .....	46
3.6	Conclusion.....	46
Chapitre 4.....		47
Cas d'étude et implémentation.....		47
4.1	Introduction .....	47
4.2	Expérience au sein du complexe GP1Z .....	47
4.2.1	Présentation du complexe GP1Z.....	47
4.2.2	L'importance de la maintenance préventive dans le complexe GP1Z .....	48
4.2.2.1.	Organisation de la maintenance préventive dans ce complexe.....	49
4.2.2.1.1	Département maintenance : .....	49
4.2.2.1.2	Département technique : .....	50
4.3	Cas d'étude : la maintenance préventive du compresseur de butane intégrée dans une plateforme PLM .....	51
4.3.1	Compresseur de butane dans GP1Z .....	51
4.3.1.1	Capteur de vibration.....	52
4.3.1.2	Capteur de Température .....	52
4.4	Création du compresseur de butane dans OpenBOM .....	53
4.4.1	Plateforme PLM OpenBom.....	53
4.4.2	Connexion à OpenBOM.....	54
4.4.3	Création de la nomenclature du compresseur .....	55
4.4.3.1	Nomenclature (BOM -Bill of Materials) .....	55
4.4.3.2	Propriétés de la nomenclature.....	55

4.5 Collecte de données à partir des capteurs du compresseur GP1Z.....	58
4.6 Procédure d'intégration des données IIoT dans OpenBom.....	59
4.6.1 Préparation des données .....	59
4.6.2 Importation des données dans OpenBOM .....	59
4.7 Utilisation ces données pour la maintenance préventive .....	63
4.8 Utilisation de l'IoT pour la démonstration .....	64
4.8.1 Matériel et logiciels utilisés .....	64
4.8.1.1 La carte Arduino .....	64
4.8.1.1.1 Présentation de la Carte Arduino UNO .....	65
4.8.1.1.2 Pourquoi Arduino UNO.....	66
4.8.1.2 Capteur DHT11 .....	66
4.8.1.3 Résistance Arduino .....	67
4.8.1.4 Arduino IDE.....	67
4.8.1.5 PLX-DAQ (Parallax Data Acquisition) .....	68
4.8.2 Notre propre démonstrateur sur la plateforme ARDUINO.....	69
4.8.2.1 Branchement d'un capteur DHT11 avec la carte Arduino.....	70
4.8.2.2 Explication du programme Arduino.....	71
4.8.2.3 Collecte des données avec PLX-DAQ .....	74
4.8.3 Maintenance préventive à partir des données collectées du capteur dht11.....	75
4.9 Conclusion.....	76
Conclusion générale .....	77
Bibliographie.....	78

# Introduction générale

L'évolution rapide de la technologie a apporté d'importants changements dans le domaine industriel. Deux concepts clés qui ont émergé et jouent un rôle important dans la transformation de l'industrie sont le PLM (Product Lifecycle Management, ou gestion du cycle de vie des produits) et l'IIoT (Internet Industriel des Objets).

La gestion du cycle de vie du produit, où le PLM (Product Lifecycle Management) est une solution qui permet de centraliser l'ensemble des outils de création et de gestion des données et des ressources de l'entreprise. Le PLM couvre tous les aspects liés à la conception et à la gestion documentaire, ainsi que toutes les composantes du système d'information, afin d'assurer la traçabilité du produit de sa fabrication à sa commercialisation, et même jusqu'à sa fin de vie et son éventuel recyclage.

D'autre part, l'Internet des objets (IoT) est une technologie en constante évolution qui permet aux objets physiques de collecter et de transmettre des données en temps réel. L'IoT peut être utilisé pour collecter des données sur les habitudes d'utilisation des consommateurs, surveiller et gérer à distance les équipements et les processus de production, ainsi que pour la maintenance prédictive des équipements.

Par ailleurs, La maintenance industrielle englobe toutes les activités entreprises pour maintenir les équipements, les machines et les opérations industrielles. L'utilisation de l'IIoT pour une maintenance efficace est essentielle afin d'éviter les pannes, maximiser la disponibilité des équipements, prolonger leur durée de vie et garantir une production sans interruption, Cette approche de maintenance efficace peut être intégrée à un système PLM.

Dans ce contexte, notre travail consistera à trouver une approche permettant d'intégrer des données IIoT dans un système PLM, afin de résoudre notre problématique concernant l'intégration entre ces deux domaines.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres de la manière suivante :

Le premier chapitre intitulé « **PLM (Product Lifecycle Management)** », est consacré à définir les principes de la gestion de cycle de vie d'un produit. En examinant son évolution au fil du temps, ses fonctions de base, ainsi que son rôle dans l'industrie. Nous inclurons également quelques exemples de logiciels PLM.

Le deuxième chapitre, intitulé « **IoT (Internet of Things)** », Nous aborderons les concepts d'IoT (Internet des objets) et d'IIoT (Internet industriel des objets) en particulier. Nous examinerons leurs applications dans différents secteurs et les avantages qu'ils peuvent offrir aux entreprises.



Le troisième chapitre, intitulé « **Intégration de l'IIoT et du PLM dans l'industrie** », présente de manière générale la maintenance et explore en détail les différentes méthodes pour intégrer l'IIoT dans un système PLM, en particulier dans le contexte de la maintenance préventive.

Le quatrième chapitre intitulé « **Cas d'étude et Implémentation** », Ce chapitre est consacré à notre expérience de stage dans le complexe GP1Z\_ Sonatrach. Nous aborderons l'importance de la maintenance préventive dans le domaine industriel. Ensuite, nous présenterons notre cas d'étude portant sur la maintenance préventive d'un compresseur de butane intégré à la plateforme PLM OpenBOM.

# Chapitre 1

## Gestion du cycle de vie d'un produit (PLM)

### 1.1 Introduction

Chaque jour, d'innombrables nouveaux produits sont lancés sur le marché. Cependant, seuls quelques-uns d'entre eux réussissent, tandis que les autres ne parviennent pas à rester et à se maintenir sur le marché. Le succès concurrentiel des entreprises manufacturières est en grande partie déterminé par le succès des produits qu'elles introduisent. C'est pourquoi les entreprises cherchent continuellement à améliorer l'efficacité de leur processus de réalisation de produits. La gestion du cycle de vie des produits (PLM) est une solution d'entreprise qui vise à créer un flux complet d'informations sur le produit et le maintenir du début à la fin.

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans un premier lieu le cycle de vie d'un produit et ses différentes phases, nous passerons ensuite à la gestion du cycle de vie d'un produit (PLM) et son évolution, les problèmes qui étaient avant PLM et pourquoi il est utilisé. Ce chapitre aborde aussi les fonctions de base de la gestion du cycle de vie d'un produit, le rôle de PLM actuellement dans l'industrie et quelques difficultés de mise en place d'un système PLM.

### 1.2 Cycle de vie d'un produit

Lorsqu'on parle du cycle de vie d'un produit quelconque, on parle de l'ensemble des différentes phases qu'il traverse tout au long de son existence, allant de sa conception, sa fabrication, son utilisation, son transport jusqu'à l'élimination de ce produit.

Le cycle de vie est généralement illustré comme une série d'étapes, depuis la production (Extraction et récolte des matières premières) jusqu'à l'évacuation finale (élimination ou valorisation), en passant par la fabrication, l'emballage, le transport, la consommation par les ménages et les industries et le recyclage ou élimination [2]. Par conséquent, le cycle de vie d'un produit est un outil de gestion utile pour tous les entrepreneurs car lorsque nous connaissons l'étape du cycle de vie du produit, nous pouvons mieux gérer le produit et ne pas gaspiller nos efforts.

#### 1.2.1 Les phases du cycle de vie du produit

Étant donné que de nombreuses entreprises doivent coordonner leurs ressources et leurs personnes à différents endroits, les processus doivent être cohérents pour maintenir le processus centré sur le produit et lui donner une meilleure chance de succès sur le marché [3]. Le cycle de vie du produit peut être défini en trois phases principales comme indiqué dans la figure 1.1.



**Figure 1.1.** Phases du cycle de vie du produit [12].

### **1.2.1.1 Début de vie (Beginning of Life -BOL) :**

La phase de début de vie comprend l'ensemble de la conception et de la fabrication, qui comprend la conceptualisation et le développement initiaux, ainsi que tous les prototypes construits tel que représenté dans la figure 1.1. BOL est le produit qui prend vie, c'est-à-dire le concept de produit est généré et ensuite physiquement réalisé. À l'aide de nombreux outils, techniques et méthodologies, les concepteurs, les planificateurs et les ingénieurs développent la conception du produit et le processus de production [2].

### **1.2.1.2 Milieu de vie (Middle of Life -MOL) :**

La phase de milieu de vie correspond à la distribution (logistique externe), l'utilisation et le support (en termes de réparation et de maintenance) comme illustré dans la figure 1.1. Dans cette phase, le produit est entre les mains du client final, c'est-à-dire l'utilisateur ou le consommateur du produit. Dans la phase MOL, les produits sont distribués, utilisés et pris en charge (réparés et entretenus) par les clients. On peut collecter des données sur les pannes, les taux de maintenance et l'expérience utilisateur pour créer un rapport à jour sur l'état des produits [2].

### 1.2.1.3 Fin de vie (End of Life -EOL) :

La phase de fin de vie correspond au retrait, au recyclage ou à la mise au rebut de produit selon la figure 1.1. En fait récupérés dans les mains de l'entreprise afin d'être recyclés (démontés, remanufacturés, réutilisés, etc.) ou éliminés. EOL est la phase où les produits sont collectés, démontés, remis à neuf, recyclés, réassemblés, réutilisés ou éliminés. Ça peut dire que la fin de vie commence lorsque les utilisateurs n'ont plus besoin du produit. À ce stade, les entreprises recueillent des informations sur les pièces et les matériaux qui ont encore de la valeur [2].

## 1.3 Qu'est-ce que le PLM ?

La gestion du cycle de vie des produits (Product Lifecycle Management -PLM) est une stratégie d'entreprise consistant à gérer de la manière la plus efficace les produits tout au long de leur cycle de vie, de la toute première idée d'un produit jusqu'à son retrait et son élimination [4]. Le PLM est un concept d'entreprise holistique qui rassemble les produits, les services, les processus, les personnes, les structures d'information et les systèmes d'information (figure 1.2) [4]. Il est considéré comme une colonne vertébrale collaborative permettant aux personnes de l'ensemble des entreprises étendues de travailler ensemble plus efficacement [5]. L'objectif est d'augmenter les revenus des produits, de réduire les coûts liés aux produits et maximiser la valeur des produits actuels et futurs pour les clients et les actionnaires [2]. Alors que certains analystes du secteur caractérisant le PLM comme une nécessité concurrentielle pour les entreprises de fabrication et de logiciels et aujourd'hui également pour les entreprises de services [5].

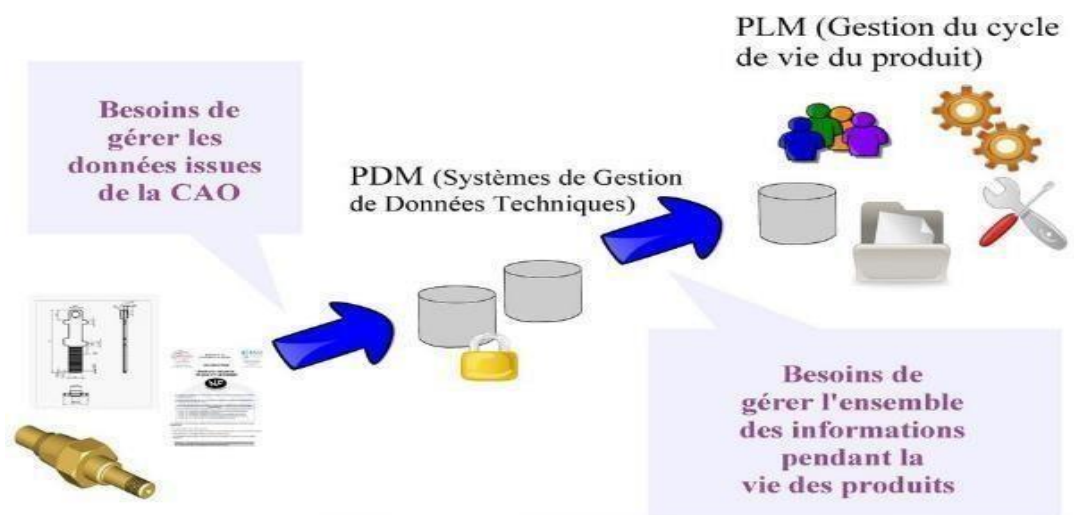


**Figure 1.2.** Le PLM est holistique [2].

## 1.4 L'évolution du PLM

Le logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) a permis au concepteur de créer plus facilement un modèle géométrique du produit dans l'ordinateur. Une telle conception peut être plus facilement réutilisée et manipulée par le concepteur selon les besoins. Le volume d'informations sur le produit créé par la conception assistée par ordinateur, La fabrication et l'ingénierie assistée par ordinateur peut devenir incontrôlable [7].

Le PDM (Product Data Management) est apparu à la fin des années 1980 pour prendre en charge la gestion et les volumes croissants de fichiers de conception générés par les systèmes de CAO tel que montré dans la figure 1.3. PDM leur a permis de standardiser les articles, de stocker et de contrôler les fichiers de documents, de maintenir les nomenclatures, de contrôler les niveaux de révision des articles, des nomenclatures et des documents, et de voir immédiatement les relations entre les pièces et les assemblages. Cette fonctionnalité leur permet d'accéder rapidement aux articles standards, aux structures de nomenclature et aux fichiers pour les réutiliser et les dériver, tout en réduisant le risque d'utiliser des versions de conception incorrectes et en augmentant la réutilisation des informations produit existantes [9].



**Figure 1.3.** Les origines du PLM [9].

Le concept de gestion du cycle de vie des produits (PLM) est apparu à la fin des années 1990 dans le but d'aller au-delà des aspects d'ingénierie d'un produit d'entreprise et de fournir une plateforme partagée pour la création, l'organisation et la diffusion d'informations relatives aux produits dans l'ensemble de l'entreprise. Le PLM cherche à gérer l'information à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, telles qu'imaginer, définir, réaliser, utiliser/supporter, et enfin retirer/éliminer en tant que tel ; ERP (Enterprise Resource Planning), CRM (Customer Relationship Management) et SCM (Supply Chain Management) font partie intégrante du PLM [8, 6].

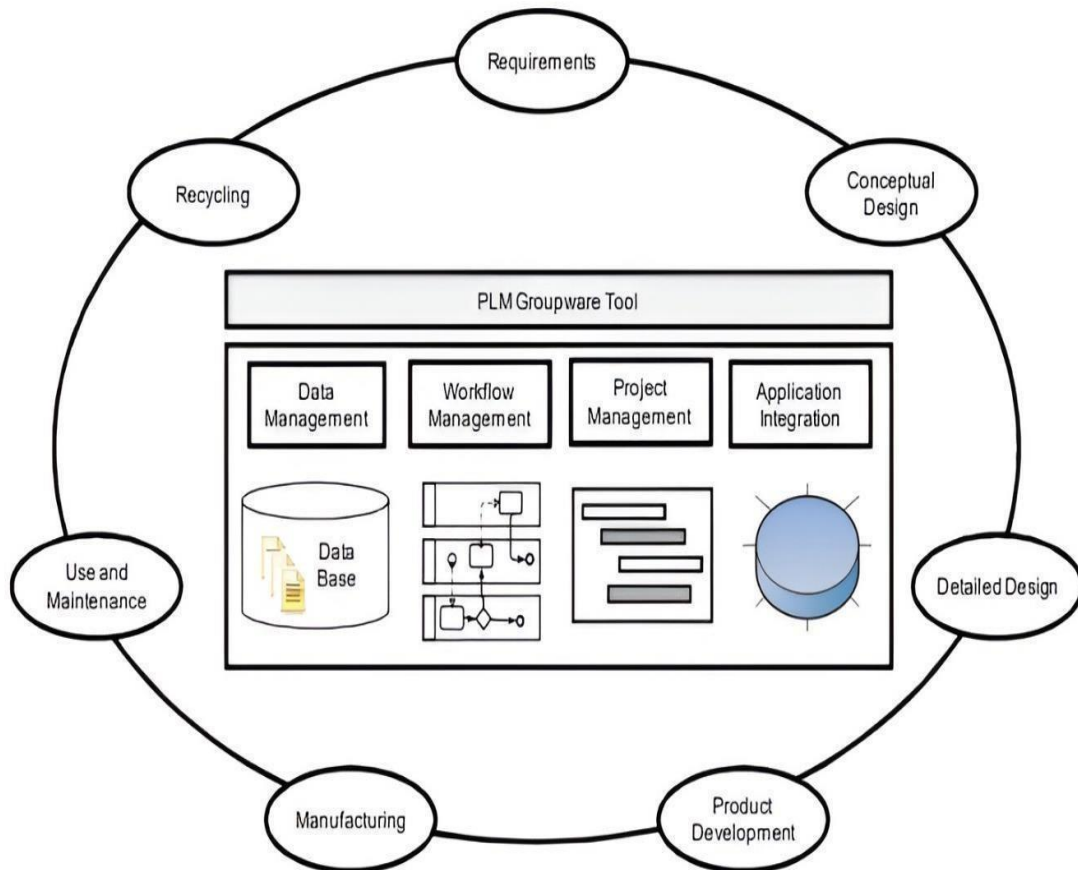
## **1.5 Pourquoi le PLM est-il utilisé ?**

Avant l'utilisation de PLM, les entreprises avaient souvent des difficultés à suivre les étapes du cycle de vie de leurs produits, depuis la conception jusqu'à la mise sur le marché et la maintenance. Cela pouvait entraîner des problèmes incluant le flux de travail en série, l'organisation par département et les améliorations au coup par coup. Dans le flux de travail en série, un produit peut prendre beaucoup de temps pour être mis sur le marché car il doit passer par plusieurs départements avant d'être commercialisé. L'organisation par département peut être source de conflits et de manque de communication entre les différents départements, ce qui peut entraîner des erreurs de conception et de coûts. Les améliorations au coup par coup sont inefficaces car elles sont réalisées par chaque département individuellement, sans coordination [2].

Ces problèmes peuvent conduire à des produits trop chers, en retard sur le marché et de mauvaise qualité, ainsi qu'à des rappels de produits une fois qu'ils sont mis en service. La solution consiste à utiliser un système PLM. Les entreprises opérant dans un environnement commercial fortement resauté doivent être en mesure d'apporter des modifications aux produits et de trouver rapidement les informations requises avec une communication fiable et efficace. Le système PLM est utile pour résoudre les problèmes liés à la gestion quotidienne des produits en raison de la complexité et du volume important de données impliquées dans leur création, leur maintenance et leur livraison. Il permet de centraliser et de gérer toutes les données liées au produit, telles que les plans de conception, les spécifications techniques, les coûts, les délais de livraison, les modifications et les mises à jour. Une solution PLM peut aider en permettant des modifications rapides et en fournissant des informations de manière efficace et fiable. Elle permet également de réduire le temps de mise sur le marché, d'améliorer la qualité des produits, de réduire les coûts et pour maximiser la rentabilité, tout en augmentant la productivité et la collaboration entre les différentes équipes [5]. Avec une solution PLM performante, les équipes peuvent mieux comprendre les enjeux et améliorer les processus et les produits.

## **1.6 Les fonctions de base du PLM**

La gestion du cycle de vie des produits (PLM) est une approche intégrée qui comprend une série de méthodes, de modèles et d'outils pour la gestion des informations et des processus au cours des différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Les outils PLM sont des outils collaboratifs utilisés pour stocker, organiser et partager des données relatives aux produits et pour coordonner les activités d'équipes distribuées dans l'avancement de toutes les étapes du cycle de vie du produit telles que la conception, la fabrication, l'approvisionnement, le service client, le recyclage et toutes les activités connexes. L'architecture de base du PLM repose sur quatre grandes fonctions génériques (représentées schématiquement sur la Figure 1.4) [10].



**Figure 1.4.** Composants de base des outils de PLM [10].

## 1.6.1 Gestion des données

Apporte un support pour l'identification, la structuration, la diffusion, la classification, la modélisation, la récupération, la visualisation et le stockage des données et processus [10]. La gestion des données techniques dans PLM s'appuie également sur SGDT (système de gestion de données techniques) ou PDM (Product data management) qui est un outil permettant de gérer les données et les processus de développement de produit.

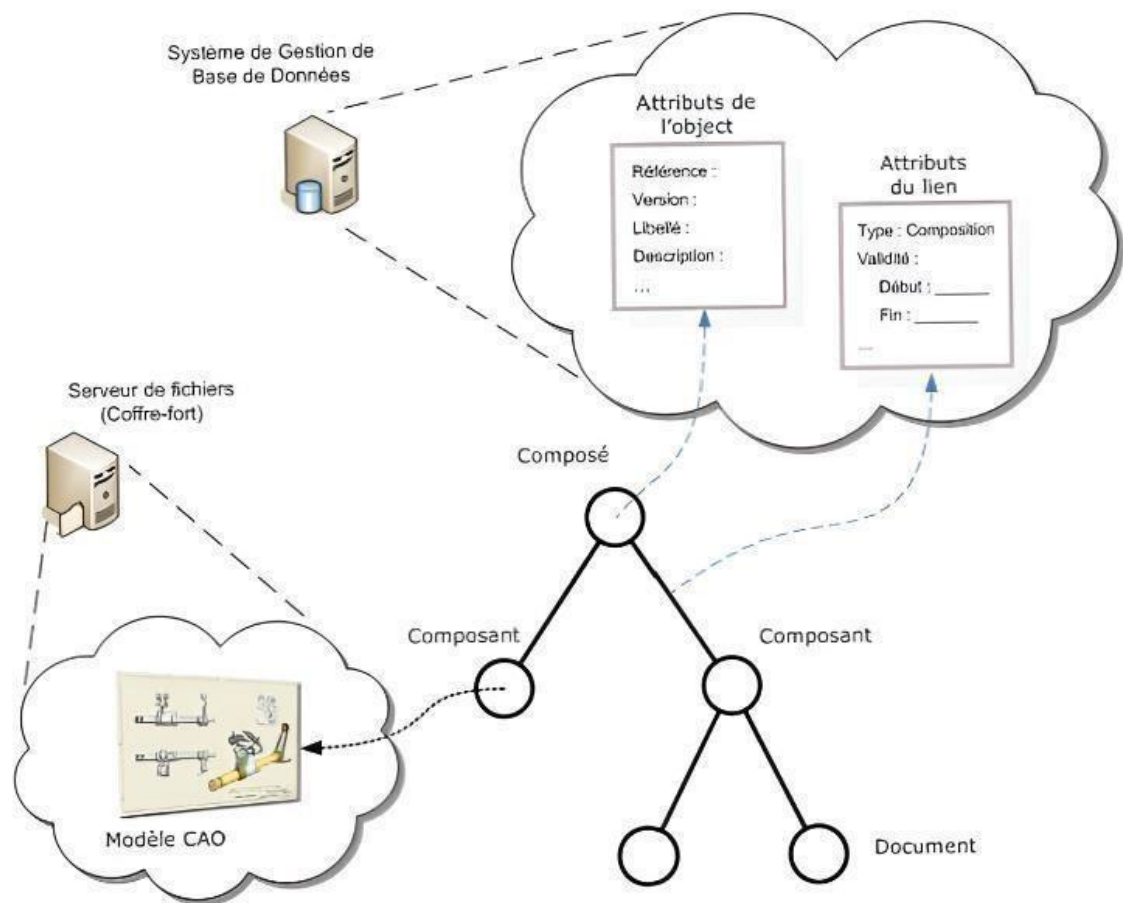
De plus, il conserve et hiérarchise toutes les données et les informations nécessaires à la définition du produit (la figure 1.5). SGDT assure un stockage centralisé des données du produit.

Cette centralisation permet de conserver l'unicité, l'accessibilité et la sécurité des informations [11].

### 1.6.1.1 Structure d'un produit

L'importance des systèmes SGDT réside dans sa capacité à organiser et gérer Différentes données évoluent tout au long de leur cycle de vie, tandis que maintenir la cohérence et l'intégrité des informations (Figure 1.5). Il comporte des fonctions de gestion des documents et les structures de produits (les informations sur les éléments liés hiérarchiquement entre eux.).

SGDT gère des objets de nombreux types et fichiers associés à ces objets (modèles CAO, fichiers bureautiques, etc.). Chaque type d'objet est identifié par son propre d'attributs [11].



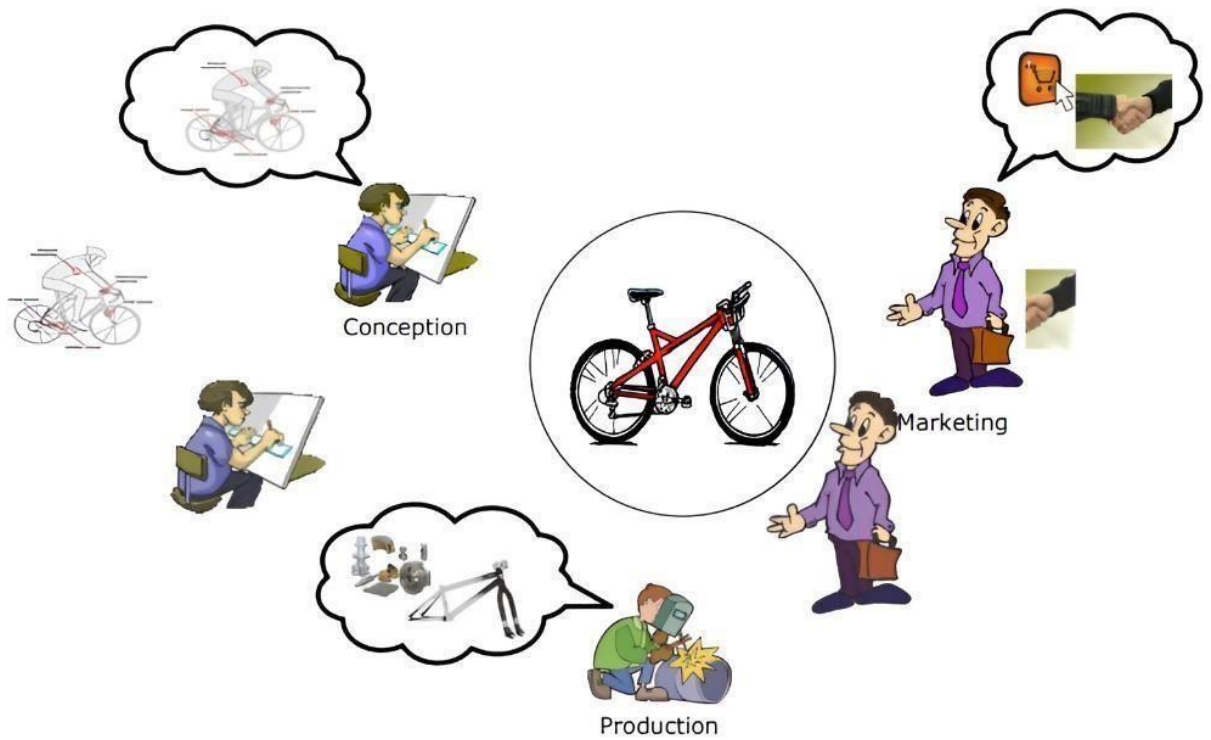
**Figure 1.5.** Structuration des données dans un SGDT [11].

### 1.6.1.2 Aspect multipoint de vue

Les outils PLM utilise L'approche multipoints de vue pour structurer l'information à partir de différents critères, soit métier, soit produit, pour la rendre plus représentative, plus compréhensive et donc concourent à la fourniture de vues externes particulières du produit, qui correspondent à des besoins spécifiques : vue d'étude, vue de production, vue maintenance, etc comme illustré dans la figure 1.6. Elle est basée sur le développement d'un modèle unique à partir de différents besoins en modélisation, ce modèle unique peut être construit par une combinaison de modèles partiels. Il est accessible selon plusieurs points de vue, ce qui permet alors de centraliser les données du modèle. Cette approche est très utilisée dans les travaux sur la représentation de produit dans les systèmes CAO [11].

Le principal avantage de l'utilisation d'un seul modèle est que les modifications apportées à un sous-modèle seront reflétées dans les autres sous-modèles. Par conséquent, les incohérences causées par le partage de données entre les modèles partiels sont évitées [11].

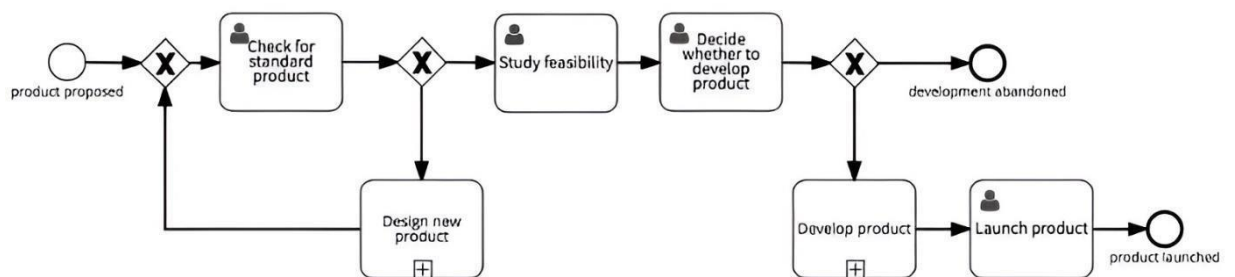




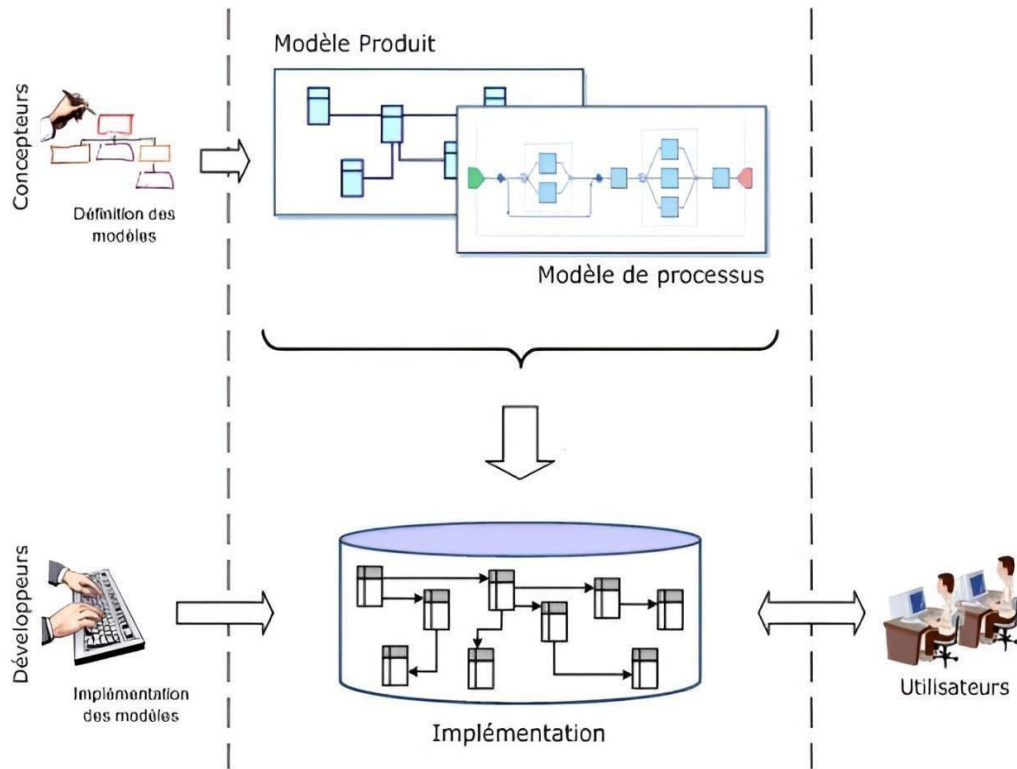
**Figure 1.6.** Notion multipoints de vue sur le produit [11].

## 1.6.2 Gestion des processus et workflow

La gestion du cycle de vie de produit s'articule autour de la gestion des données et la gestion des processus. Un processus permet, à partir d'un modèle de processus (workflow), de guider le déroulement d'une suite de tâches métiers (validation de données, modification de produit, gestion de conflits, etc.), de coordonner les actions à réaliser et de capitaliser les différentes actions menées. Cette capitalisation est nécessaire pour pouvoir réutiliser des savoir-faire et garder la trace des divers choix effectués par les acteurs sur les produits tout au long de leur cycle de vie. C'est à partir de la définition des modèles de processus et de produit réalisés par les concepteurs qu'est proposée aux utilisateurs une implémentation physique d'une application PLM (Figure 1.7 et 1.8) [11].



**Figure 1.7.** Modèle Workflow de lancement d'un produit [11].



**Figure 1.8.** Modèle Produit et Modèle de processus [11].

### 1.6.3 Gestion de projet

Permet de planifier, gérer, surveiller et contrôler l'ensemble du processus de développement de projet, de l'idée initiale à l'achèvement, permettant aux chefs de projet de contrôler les structures, les calendriers, les coûts et les ressources du projet [10].

### 1.6.4 Intégration d'applications

Prend en charge la définition et la gestion des interfaces entre le PLM et différentes applications de création comme la CAO (conception assistée par ordinateur), FAO (Fabrication Assistées par Ordinateur) et les logiciels d'entreprise intégrés tels que les systèmes ERP (Enterprise Resource Planning), KBE (Knowledge based engineering), SCM (Supply Chain Management) et d'autres comme illustré dans la figure 1.9. Ce type d'outil est développé pour aider les concepteurs de produits et pour fournir un support de traçabilité de l'évolution des exigences à l'utilisation et même au recyclage du produit [11].

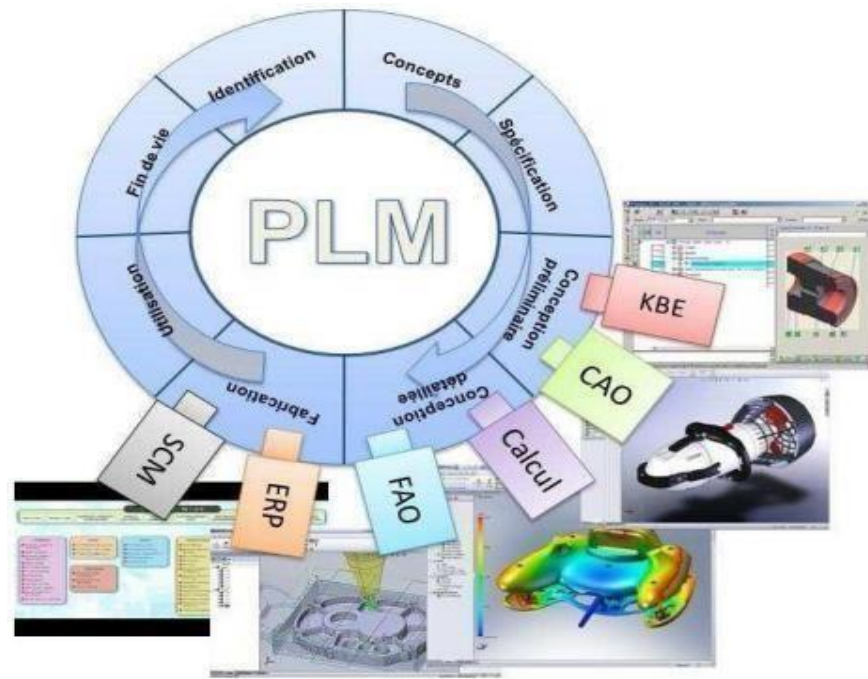


Figure 1.9. Système PLM et applications métier [12].

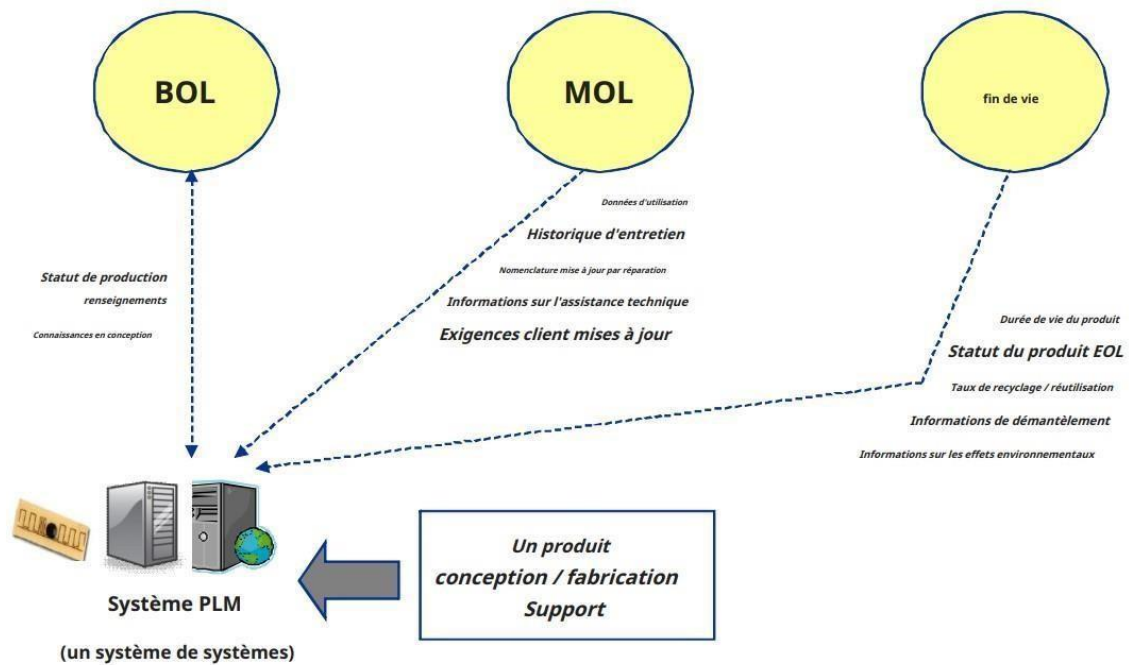
## 1.7 Le rôle du PLM dans l'industrie

Le PLM n'implique pas simplement une couverture des concepts existants, mais exprime une nouvelle architecture multi-niveaux et multi-systèmes, s'appuyant et fournissant une combinaison cohérente de l'orientation de produit et de la perspective du cycle de vie. Cette perspective est exprimée en détail dans les sections suivantes en analysant le rôle du PLM dans les trois différentes phases du cycle de vie (BOL, MOL, EOL) qui sont déjà illustrées précédemment dans la figure 1.1[7].

### 1.7.1 PLM en phase BOL (Beginning of Life)

Essentiellement, la phase BOL traite de la conception et de la fabrication du produit (comme nous avons vu précédemment dans la figure 1.1). Ces deux activités sont fondamentalement différentes. La conception de produits est une activité intellectuelle récursive et itérative qui implique que les concepteurs et les ingénieurs trouvent des solutions à un problème donné. Au contraire, la fabrication est une activité transactionnelle répétitive qui se concentre principalement sur la mise en pratique des décisions des autres.

Les concepteurs et les ingénieurs sont généralement mesurés en efficacité, les fabricants sont généralement mesurés en efficacité [4]. Dans la phase BOL, le PLM joue le rôle d'un système d'aide à la conception (Figure 1.10). Il crée et gère efficacement les données de conception du produit à publier dans le bon environnement au bon moment pour garantir une fabrication efficace.



**Figure 1.10.** Modèle pour les opérations BOL utilisant les informations MOL et EOL [4].

## 1.7.2 PLM dans les phases MOL (Middle of Life) et EOL (End Of Life)

La phase MOL traite de la « vraie vie » du produit, lorsqu'il est entre les mains du client, tandis que la phase EOL traite de sa « mort » (comme nous avons vu précédemment dans la figure 1.1). Durant ces phases, de nombreux acteurs interagissent avec le produit : les clients, le recyclage, etc. Tous ces acteurs exercent des activités répétitives, cependant, ils échangent actuellement très peu d'informations avec d'autres acteurs. Aux phases MOL et EOL, le PLM est avant tout un système de support de services (Figures 1.11 et 1.12), qui peut être interprété comme un système de systèmes pour collecter les données produit sur site et surveiller l'état de la durée de vie du produit.

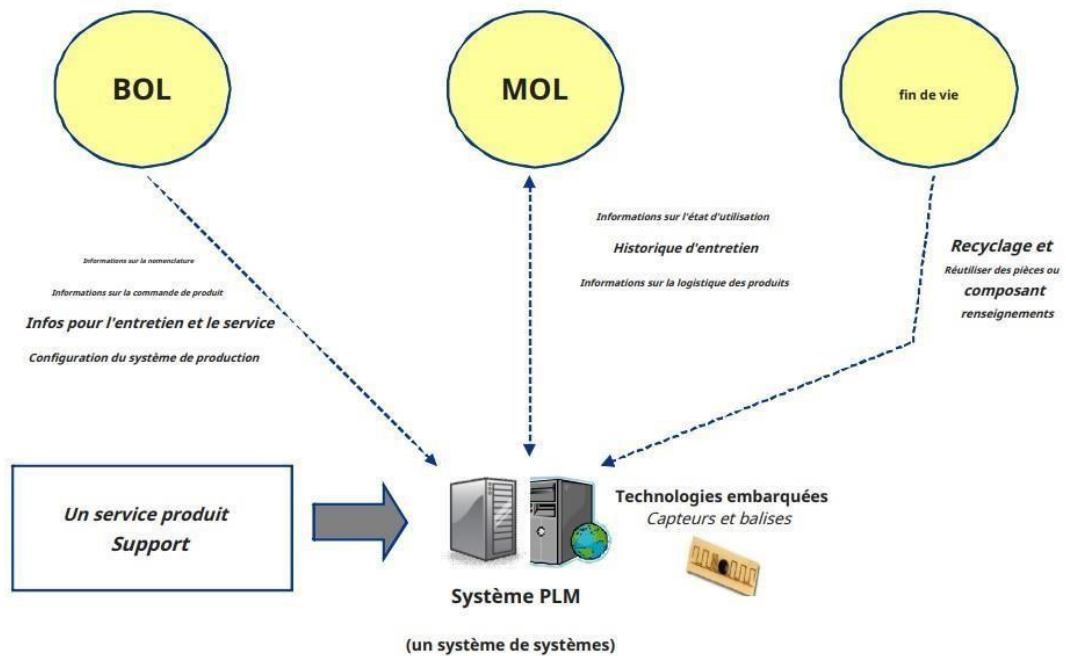


Figure 1.11. Modèle pour les opérations MOL utilisant les informations BOL et EOL [4].

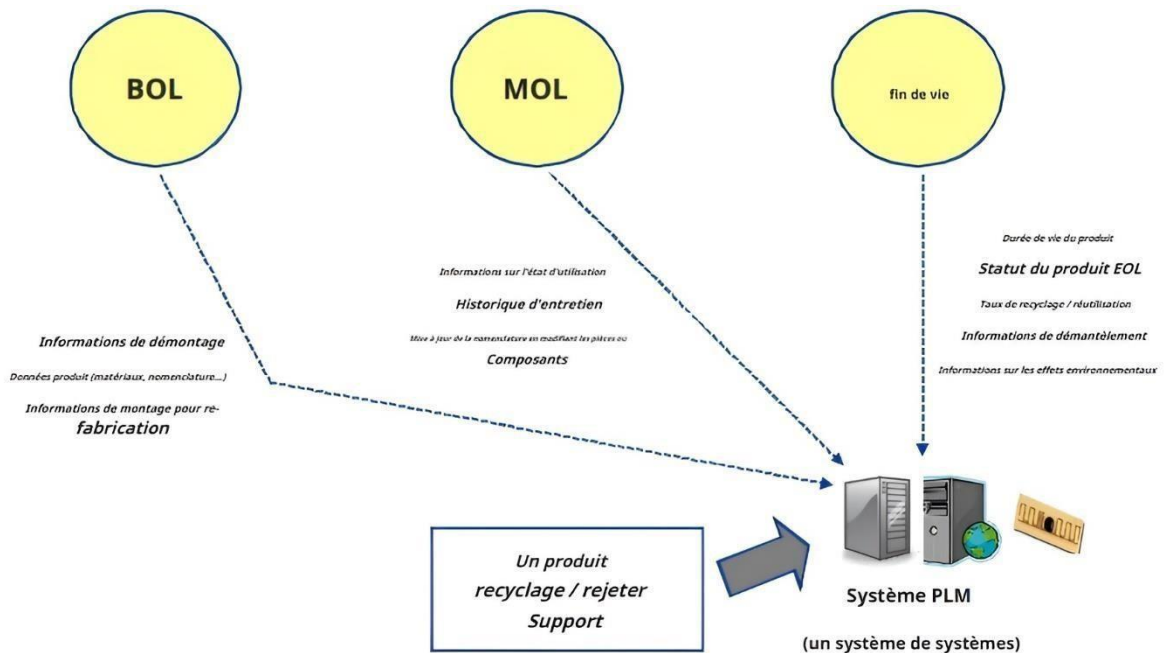






Figure 1.12. Modèle pour les opérations EOL utilisant les informations BOL et MOL [4].




## 1.8 Quelques logiciels PLM

Le choix du bon logiciel PLM revêt une grande importance pour les entreprises, que ce soit pour assurer un développement efficace des produits ou des processus de fabrication, l'adoption du meilleur logiciel PLM peut contribuer à l'atteinte des objectifs fixés. Les entreprises utilisent les logiciels PLM pour insérer les données tout au long du processus de développement d'un produit, depuis la gestion des documents jusqu'aux systèmes commerciaux. Cela permet aux équipes d'augmenter leur productivité, d'améliorer la qualité des produits et de réduire le délai de mise sur

le marché. Le tableau suivant présente une comparaison des meilleurs logiciels de gestion du cycle de vie des produits (PLM).

**Tableau 1.** Tableau comparatif des logiciels de PLM.

Logiciel PLM	Logo	Tarification	Taille d'entreprise	Principales caractéristiques
<b>OpenBom</b>		Gratuit (utilisateur par mois) 350 \$ (équipe par mois) 850 \$ (entreprise par mois)	PME et grandes entreprises	-Gestion des nomenclatures (BOM) -Importation et Exportation des données -Gestion de la qualité et les coûts des produits -Gestion de documents, de changements et d'articles -La planification de la production -La collaboration d'équipes -Recherche et analyse -Intégrations avec les systèmes CAO, PDM, PLM, ERP
<b>Siemens Teamcenter</b>		Structure de prix basée sur des devis	PME et grandes entreprises	-Gestion des nomenclatures (BOM) -Gestion de la conception électrique et mécanique. -Gestion du changement et flux de travail. -Gestion des données et des processus de fabrication. -Visualisation, maquette numérique et réalité virtuelle. -Gestion et publication de documents.
<b>PTC Windchill</b>		Structure de prix basée sur des devis	PME et grandes entreprises	-Outils de transformation de la nomenclature (BOM). -Flux de travail personnalisable -Intégration de la chaîne d'approvisionnement -Gestion des documents techniques -Intégration avec les outils de conception CAO -Estimation et analyse des coûts. -Capacité à collaborer et à travailler à partir de différents endroits
<b>Oracle Agile PLM</b>		Structure de prix basée sur des devis	PME et grandes entreprises	-Gestion de l'innovation -Développement de produits -Intégration avec les outils de conception CAO -Gestion des données de base des produits -Modélisation du configurateur -Gestion des fournisseurs -Gestion de portefeuille -La collaboration à distance -Gestion des coûts et de la qualité

<p><b>SAP PLM</b></p>		<p>Structure de prix basée sur des devis</p>	<p>PME et grandes entreprises</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ingénierie du produit.</li> <li>-Coordination du plan de projet.</li> <li>-Gestion des tâches et des problèmes.</li> <li>-Contrôle des documents du projet.</li> <li>-Gestion du portefeuille de projets.</li> <li>-Gestion de projets commerciaux.</li> <li>-Calcul et simulation du coût du produit.</li> <li>-Acquisition et gestion des exigences.</li> <li>-Collaboration sur les produits et visualisation d'entreprise</li> </ul>
<p><b>Autodesk Fusion</b></p>		<p>Professionnel : 965 \$ (utilisateur par ans)</p> <p>Entreprise : 1 935 \$ (utilisateur par ans)</p>	<p>PME et grandes entreprises</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Configurer et gérer les nomenclatures (BOM).</li> <li>-Gestion des données produit</li> <li>-Rapports et analyses</li> <li>-Gestion de la qualité</li> <li>-Collaboration avec les fournisseurs. -Gestion des versions, révisions et mises à jour. - Gestion des données produit (PDM). -Accès en temps réel à toutes les données de produit. - Tableaux de bord graphiques pour une interprétation rapide</li> </ul>
<p><b>Upchain PLM</b></p>		<p>Participant : 30 \$ (utilisateur par moi)</p> <p>Équipe : 70 \$ (utilisateur par moi)</p> <p>Professionnel : 200 \$ (utilisateur par moi)</p>	<p>PME et grandes entreprises</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Gestion des nomenclatures (BOM)</li> <li>-Tableaux de bord et KPI du projet</li> <li>-Numérotation des pièces automatisée</li> <li>-Gestion de projet agile</li> <li>-Visualiser les fichiers CAO en 2D/3D</li> <li>-Gestion des données multi-CAO</li> <li>-Accès mobile</li> <li>-Gestion du portefeuille de produits</li> <li>-Conception collaborative et révision</li> </ul>

## 1.9 Conclusion

Aujourd'hui, le PLM est une approche indispensable pour une gestion efficace des processus de développement et de création de produits. Il aide les entreprises à gérer toutes les informations liées à leurs produits tout au long de leur cycle de vie, cette approche constitue un catalyseur technologique et organisationnel essentiel. Cependant, avec l'émergence de l'Internet des objets (IoT), de nouvelles opportunités se présentent aux entreprises. L'IoT offre la possibilité de collecter des données en temps réel sur les produits et les utilisateurs, ce qui peut aider les entreprises à améliorer leur compréhension des besoins des clients et à améliorer leurs produits en conséquence. Dans le prochain chapitre, notre étude portera sur l'Internet des objets (IoT) et son impact sur la gestion des produits.

# Chapitre 2

## L'Internet des Objets (IoT)

### 2.1 Introduction

Au cours des dernières années, Internet a connu une évolution considérable, qui a permis de connecter des milliards d'objets à travers le monde. Ces objets ont des caractéristiques différentes telles que leur taille, leurs capacités de traitement, leurs puissances de calcul, ainsi que leurs capacités à prendre en charge différents types d'applications. En conséquence, l'Internet traditionnel se transforme en un futur Internet intelligent, appelé IoT. L'IoT connecte des objets du monde réel et intègre l'intelligence dans le système pour traiter intelligemment les informations spécifiques de l'objet et prendre des décisions autonomes utiles. Ainsi, l'IoT peut donner naissance à d'énormes applications et services utiles que nous n'avions jamais imaginés auparavant.

Dans ce chapitre, nous commencerons par définir ce qu'est un objet connecté, puis nous présenterons l'IoT (Internet des objets), en décrivant ses composantes, son architecture ainsi que les différents domaines d'application de cette technologie et les avantages qu'elle peut offrir et nous consacrons par la suite le reste du chapitre à l'utilisation d'IoT dans le domaine de l'industrie (IIoT).

### 2.2 L'internet des objets (IoT)

#### 2.2.1 Un objet connecté

Avant de définir le concept d'internet des objets, il est important de comprendre ce qu'est un objet connecté. Un objet connecté est un appareil physique équipé de capteurs qui envoient des données vers une application mobile ou un service web via une connexion internet, pour une variété de domaines d'application [40]. L'objet connecté a pour fonction de collecter des données à partir des capteurs, de les traiter, puis de les communiquer grâce à une fonction de connectivité. De plus, il peut recevoir des instructions pour exécuter des actions [33].

#### 2.2.2 Définition de IoT

L'IoT est l'acronyme d'Internet of Things (Internet des Objets -en français). Le terme IoT est apparu la première fois en 1999 dans un discours de l'ingénieur britannique Kevin ASHTON [41]. Selon l'UIT (Union Internationale des Télécommunications), l'Internet des objets défini comme « une infrastructure mondiale pour la société de l'information, permettant de disposer de services évolués en interconnectant des objets physiques ou virtuels à l'aide de technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution » [42]. L'IoT





traitement et de stockage de données, permettant ainsi une prise de décision locale plus rapide et plus efficace. Cette évolution a donné lieu à des systèmes de capteurs plus complexes, tels que les systèmes de surveillance de la santé, de la qualité de l'air, de sécurité et de surveillance de la maison, Etc. Ces systèmes de capteurs ont ensuite été intégrés à l'internet pour devenir l'IoT (Internet des objets), qui comprend une grande variété d'objets connectés tels que les voitures, les appareils électroménagers intelligents, les montres connectées, les thermostats intelligents, les serrures intelligentes ... etc [59].

## 2.2.4 Domaines d'application de l'IoT

Les applications de l'Internet des objets (IoT) sont vastes et variées et touchent de nombreux domaines différents [27]. En effet, tous les objets électroniques peuvent être connectés et devenir des objets connectés [34]. La figure 2.2 illustre certains des domaines d'application de l'IoT.

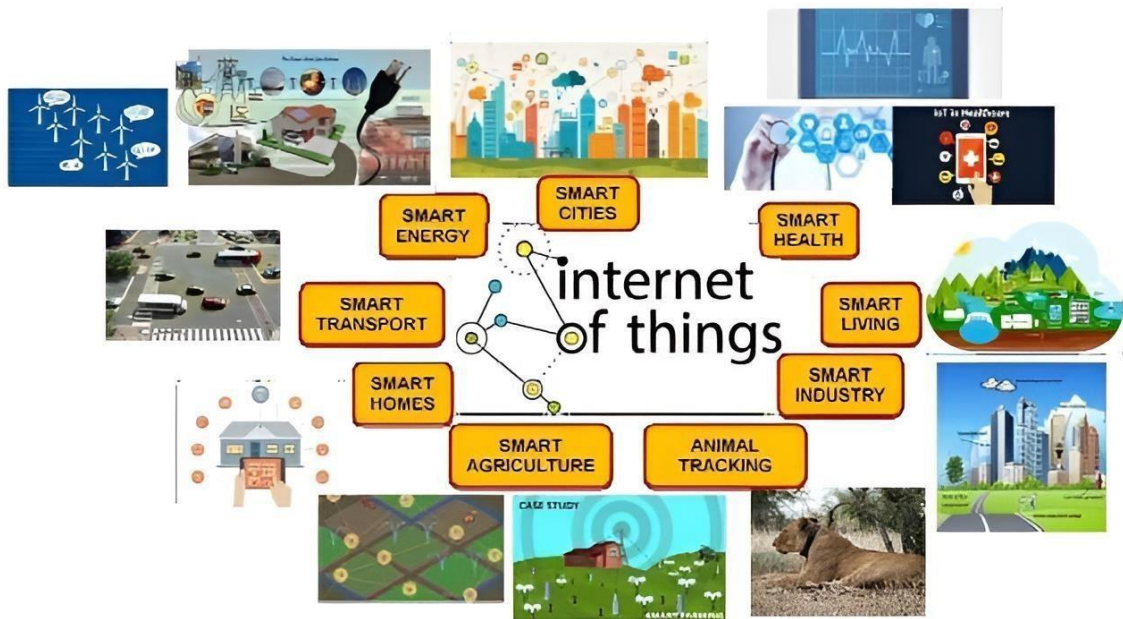


Figure 2.2. Domaines d'application de l'IoT [26].

### 2.2.4.1 La vie intelligente (Smart Living) :

L'Internet des objets (IoT) a le potentiel de simplifier toutes les tâches de la vie quotidienne, que ce soit pour les individus ou la société en général. Les appareils télécommandés qui permettant d'allumer et éteindre les appareils à distance, les stations météorologiques qui permettent d'afficher les conditions météorologiques extérieures telles que l'humidité, la température, la vitesse du vent et les niveaux de pluie, des appareils électroménagers intelligents telle que les réfrigérateurs avec écran LCD indiquant ce qu'il y a à l'intérieur, les aliments qui sont sur le point d'expirer, les ingrédients que nous devons acheter et avec toutes les informations disponibles sur une application Smartphone. Les cuisinières avec interface vers une application Smartphone permettant de régler la température à distance et de suivre l'autonettoyage du four, surveillance de la sécurité tel que les caméras et les systèmes d'alarme, ... etc [26]. Tout ceci n'est que quelques exemples des multiples possibilités offertes par l'IoT pour simplifier notre quotidien.

#### **2.2.4.2 Les villes intelligentes (Smart Cities) :**

L'IoT offre la possibilité de créer des villes intelligentes grâce à une variété de capteurs capables de détecter des paramètres tels que la température, l'humidité, la pollution de l'air et de l'eau. L'IoT peut améliorer les villes à plusieurs niveaux [29], Il est ainsi possible de surveiller les vibrations et de l'état des matériaux dans les bâtiments, les ponts et les monuments historiques [26]. Ainsi que d'optimiser l'éclairage public et d'arroser efficacement les jardins publics [24].

#### **2.2.4.3 Les maisons intelligentes (Smart Homes) :**

Appelée également domotique [29], L'IoT peut aider à la conception de maisons intelligentes. La maison du futur sera un objet connecté à Internet accessible à distance [28]. Les différents appareils connectés de la maison, tels que la télévision, la climatisation, le chauffe-eau, les lumières et les ventilateurs, pourront être contrôlés à partir d'un concentrateur centralisé, qui sera généralement un téléphone intelligent, une tablette ou un ordinateur. Ces objets domestiques seront connectés au téléphone intelligent à l'aide de technologies IoT telles que le Wifi, le Bluetooth, le ZigBee, ou une combinaison de celles-ci [29].

#### **2.2.4.4 La santé intelligente (Smart Health) :**

Le domaine médical peut également bénéficier de l'IoT afin d'améliorer la qualité de vie ou sauver des vies [24]. Grâce à cette technologie, il est possible de surveiller à distance l'état de santé des patients et d'intervenir rapidement en cas de besoin. Les capteurs médicaux peuvent être portables ou implantés à l'intérieur du corps. Les capteurs portables permettent de mesurer différents paramètres tels que la fréquence cardiaque, la température corporelle ou encore les calories. Les capteurs implantés, quant à eux, sont utilisés pour surveiller en permanence la santé des patients. Par exemple, un capteur implanté dans le corps peut permettre au médecin de suivre le rythme cardiaque ou le pouls du patient [29].

#### **2.2.4.5 Le transport Intelligent (Smart Transport) :**

L'Internet des Objets (IoT) joue un rôle important dans le domaine du transport et de la logistique [30]. Grâce à une technologie avancée de capteurs, d'informations et de réseau, le système de transport intelligent permet une gestion efficace des déplacements. Les nombreuses fonctionnalités du transport intelligent incluent le péage routier électronique sans arrêt, la surveillance des violations des règles de la route, la prévention du vol, l'évitement des embouteillages, la signalisation des incidents de circulation, l'utilisation d'un balisage intelligent et la minimisation des retards [24]. L'IoT peut également contribuer à sauver des vies, à réduire l'impact environnemental des véhicules et à renforcer la sécurité routière.

#### **2.2.4.6 L'énergie intelligente (Smart Energy) :**

L'utilisation de l'IoT dans le domaine de l'énergie est une réponse aux défis importants rencontrés dans ce secteur. La révolution numérique a entraîné l'introduction de nouvelles technologies dans la gestion des ressources énergétiques, notamment les compteurs énergétiques et les réseaux électriques intelligents (Smart Grid). Ces outils permettent de mieux contrôler la consommation d'énergie, de surveiller et d'analyser les flux d'énergie provenant des éoliennes et des centrales électriques. Des contrôleurs d'alimentation sont également utilisés pour déterminer la quantité d'énergie nécessaire et améliorer l'efficacité énergétique tout en réduisant les pertes d'énergie [26].

#### **2.2.4.7 L'agriculture intelligente (Smart Agriculture) :**

Dans le domaine agricole, l'utilisation de l'IoT est couramment désignée sous le terme de Smart Farming [31]. Grâce à un réseau de divers capteurs, les données peuvent être collectées, analysées et transmises à l'agriculteur via une infrastructure de communication. Ce système intelligent offre aux agronomes une meilleure compréhension des modèles de croissance des plantes et une meilleure gestion des pratiques agricoles, en tenant compte des conditions du sol et de la variabilité climatique [24]. Cela permettant d'améliorer considérablement la productivité agricole en évitant les conditions de culture inappropriées [26].

#### **2.2.4.8 L'industrie intelligente (Smart Industry) :**

Le déploiement de l'Internet des objets (IoT) dans l'industrie aura sans aucun doute un impact positif sur l'économie et le secteur des services. L'introduction de l'usine intelligente a ajouté une nouvelle valeur à la révolution de la fabrication en intégrant l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'automatisation du travail, ainsi que la communication machine à machine avec le processus de fabrication. Ce changement fondamental permettra d'inventer, de fabriquer et d'expédier des produits de manière plus efficace, tout en améliorant la sécurité des travailleurs et en protégeant l'environnement contre les incidents de fabrication. La communication améliorée entre les machines et autres objets, ainsi que le transfert de la prise de décision des humains aux systèmes techniques, rend la fabrication plus "intelligente" [24]. La révolution industrielle et de la fabrication est devenue l'une des technologies les plus avancées, permettant la planification automatique de la maintenance, la prédiction précoce des pannes d'équipement et la maintenance des services en installant des capteurs à l'intérieur de l'équipement pour surveiller et envoyer des rapports [26]. Les usines connectées à Internet sont donc plus productives, plus efficaces et plus intelligentes que celles qui ne le sont pas. La section suivante se concentrera en particulier sur ce type d'application.

## 2.2.5 Les Composants De L'IoT

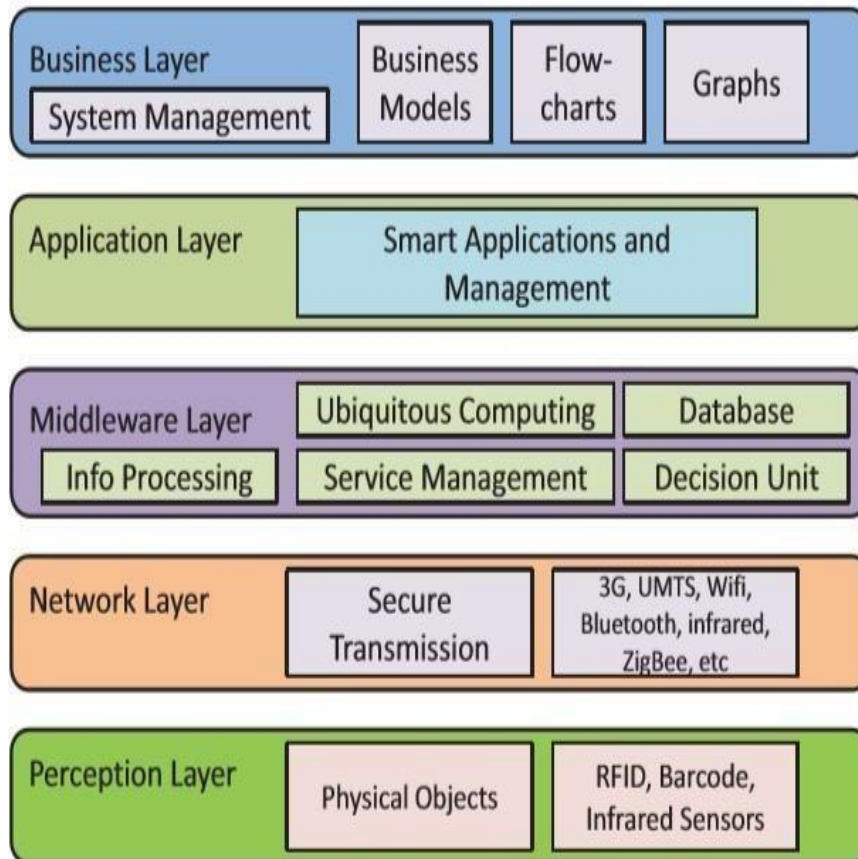
L'Internet des Objets (IoT) est un réseau de dispositifs interconnectés qui communiquent entre eux pour collecter et échanger des données. Le tableau suivant présente les composants de base de l'IOT :

**Tableau 2.** Les composants de base d'un système IoT [25].

<b>Composants IoT</b>	<b>La description</b>
<b>Objets physiques</b>	Un objet connecté est un objet physique équipé de capteurs ou d'une puce qui lui permettent de transcender son usage initial pour proposer de nouveaux services. Il s'agit d'un matériel électronique capable de communiquer avec un ordinateur, un smartphone ou une tablette via un réseau sans fil (WiFi, Bluetooth, réseaux de téléphonie mobile, réseau radio à longue portée de type Sigfox ou LoRa, etc.), qui le relie à Internet ou à un réseau local.
<b>Capteurs</b>	Ils sont installés sur les objets connectés, ils sont plus ou moins intelligents, selon qu'ils intègrent ou non eux-mêmes des algorithmes d'analyse de données, et qu'ils soient pour certains auto-adaptatifs. Les capteurs connus sont : Capteurs de température, Capteurs de pression et Humidité, Détecteurs d'intensité lumineuse, Détection de proximité et les étiquettes RFID.
<b>Gens</b>	Exemple : Les humains peuvent contrôler l'environnement via des applications mobiles.
<b>Prestations de service</b>	Exemple : Services Cloud - peuvent être utilisés pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Traiter les Big Data et les transformer en informations précieuses</li> <li>✓ Construire et exécuter des applications innovantes</li> <li>✓ Optimiser les processus métier en intégrant les données de l'appareil.</li> </ul>
<b>Plateformes</b>	Les plateformes IoT sont des intergiciel utilisés pour connecter les différents composants de l'IoT, tels que les objets, les personnes et les services, à leur environnement. Elle fournit de nombreuses fonctions : accès aux appareils, Assurer une installation correcte de l'appareil, assurer une interopérabilité complète des composants IoT... etc.
<b>Réseaux</b>	Les réseaux permettent aux différents composants de l'IoT de communiquer entre, et ils utilisent une variété de technologies, normes et protocoles, qu'ils soient sans fil ou filaires.

## 2.2.6 Architecture de l'Internet des objets

L'architecture proposée pour l'IoT doit tenir compte de nombreux facteurs tels que l'évolutivité, l'interopérabilité, la fiabilité et la qualité de service. Étant donné que l'IoT connecte tout et tout le monde pour échanger des informations entre eux, le trafic et les stockages dans le réseau augmenteront également de manière exponentielle. Ainsi, le développement de l'IoT dépend des progrès technologiques et de la conception de diverses nouvelles applications et modèles commerciaux. L'architecture de base de l'IoT est proposée dans [46] et [47]. Généralement, la structure de l'IoT est divisée en cinq couches, comme illustré à la Figure 2.3 Ces couches sont brièvement décrites ci-dessous :



**Figure 2.3.** L'architecture de base de l'IoT [47].

### **2.2.6.1 Couche de perception :**

La couche de perception s'agit de la couche la plus basse de l'architecture IoT. Elle est également connue sous le nom de « couche périphérique ». Elle se compose des objets physiques et des dispositifs de détection. Les capteurs peuvent être RFID (Radio frequency identification), code-barres 2D ou capteur infrarouge selon la méthode d'identification des objets. Cette couche traite essentiellement de l'identification et de la collecte d'informations spécifiques aux objets par les dispositifs de détection. Selon le type de capteurs, les informations peuvent concerner l'emplacement, la température, l'orientation, le mouvement, les vibrations, l'accélération, l'humidité, les changements chimiques dans l'air, etc. Les informations collectées sont ensuite transmises à la couche réseau pour leur transmission sécurisée au système de traitement de l'information [47] [48].

### **2.2.6.2 Couche réseau :**

La couche réseau peut également être appelée « couche de transmission ». Cette couche transfère en toute sécurité les informations des dispositifs de détection vers les systèmes de traitement de la couche middleware via les supports de transmission tels que WiFi, Bluetooth, WiMaX, Zigbee, GSM, 3G, etc. selon les dispositifs de détection avec des protocoles comme IPv4, IPv6, MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), DDS (Data Distribution Service), etc [49].

### **2.2.6.3 Couche middleware :**

Cette couche traite les informations reçues des dispositifs capteurs [50]. Elle comprend les technologies comme le Cloud computing, l'Ubiquitous computing qui assure un accès direct à la base de données pour stocker toutes les informations nécessaires reçues de la couche réseau. À l'aide de certains équipements de traitement intelligents, les informations sont traitées et une action entièrement automatisée est entreprise en fonction des résultats traités des informations [47].

### **2.2.6.4 Couche d'application :**

Cette couche fournit une gestion globalement de l'application en fonction des informations des objets traités dans la couche Middleware. Puisque les applications favorisent le développement de l'IoT, cette couche est donc très utile dans le développement à grande échelle du réseau IoT. Les applications mises en œuvre par l'IoT peuvent être la santé intelligente, l'agriculture intelligente, la maison intelligente, la ville intelligente, L'industrie intelligente, etc [47].

### 2.2.6.5 Couche métier :

Cette couche est responsable de la gestion de l'ensemble du système IoT, y compris les applications et les services. Il construit des modèles commerciaux, des graphiques, des organigrammes, etc. basés sur les données reçues de la couche Application. Le véritable succès de la technologie IoT dépend également des bons modèles commerciaux. Sur la base de l'analyse des résultats, cette couche aidera à déterminer les actions futures et les stratégies commerciales [47].

### 2.2.7 Les étapes pour la mise en place de l'IoT

Les objets connectés sont au cœur de l'internet des objets, mais il est important de pouvoir connecter l'ensemble de ces objets, les faire échanger des informations et interagir au sein d'un même environnement. La mise en place de l'IoT passe par les étapes suivantes : l'identification, l'installation de capteurs, la connexion des objets entre eux, l'intégration et la connexion à un réseau [51]. Le Tableau suivant résume les étapes et les protocoles éventuels.

**Tableau 3.** Les étapes et les technologies pour la mise en place de l'IoT [51].

Identifier	Capter	Connecter	Intégrer	Mettre en réseau
Rendre possible l'identification de chaque élément connecté.	Mise en place de dispositifs nous rapprochant du monde réel. Les fonctions de base des objets (le capteur de température pour le thermomètre par exemple).	Etablir une connexion entre tous les objets afin qu'ils puissent dialoguer et s'échanger des données.	Disposer d'un moyen de communication rattachant les objets au monde virtuel.	Relier les objets et leurs données au monde informatique via un réseau (Internet par exemple).
IPv4, IPv6, 6LoWPAN	MEMS, RF MEMS, NEMS	SigFox, LoRa	RFID, NFC, Bluetooth LE, ZigBee, WiFi, réseaux cellulaires (LTE-4G et 5G)	CoAP, MQTT, AllJoyn, REST HTTP



## 2.2.8 Les avantages de l'internet des objets (IoT)

L'IoT est devenu l'une des technologies les plus importantes de ces dernières années. Il est utilisé pour connecter des objets du quotidien à Internet. Cela permet de créer des environnements intelligents et connectés où les appareils peuvent communiquer entre eux et avec les systèmes informatiques, ce qui offre plusieurs avantages :

- **Automatisation** : L'IoT peut automatiser de nombreuses tâches dans différents secteurs. Les capteurs et les appareils connectés peuvent être programmés pour effectuer certaines tâches en fonction des données qu'ils collectent. Cela améliore l'efficacité opérationnelle et réduit les coûts. Par exemple, des capteurs de température peuvent être utilisés pour réguler la température dans les bâtiments, ou des machines peuvent être surveillées en temps réel pour identifier les pannes potentielles [28] [40].
- **Amélioration de la productivité** : L'IoT peut augmenter la productivité en fournissant des données en temps réel sur les processus de production et les performances des machines, permettant aux entreprises de prendre des décisions plus rapidement. Les employés peuvent également accéder aux données à distance, ce qui peut contribuer à améliorer l'efficacité et la productivité, ce qui se traduit par des économies de coûts, une meilleure qualité des produits et une augmentation des bénéfices [28] [40].
- **Réduction des coûts** : L'IoT peut réduire les coûts en optimisant l'utilisation des ressources, en réduisant les temps d'arrêt imprévus et en prolongeant la durée de vie de l'équipement grâce à la planification automatisée de la maintenance [28] [58].
- **Amélioration de la qualité de vie** : L'IoT peut améliorer la qualité de vie des utilisateurs en facilitant l'accès à des services, en surveillant la santé des individus, en fournissant des alertes pour prendre des médicaments ou en surveillant les patients à distance. L'IoT peut améliorer la qualité de vie des utilisateurs en facilitant l'accès à des services, en surveillant la santé des individus, en fournissant des alertes pour prendre des médicaments ou en surveillant les patients à distance. De plus, il peut optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments, réduisant ainsi l'impact environnemental et les coûts [28].
- **Sécurité** : L'IoT peut améliorer la sécurité en fournissant des alertes en temps réel sur les dangers potentiels et en permettant des réponses rapides. Par exemple, en utilisant des caméras de sécurité, l'IoT peut détecter les intrusions et alerter immédiatement les autorités nécessaires [58].

## 2.3 L'Internet des Objets dans l'industrie (IIoT) :

L'Internet Industriel des Objets (IIoT - Industrial Internet of Things) est le déploiement de l'IoT en milieu industriel. Consiste en l'utilisation de la technologie IoT pour connecter et faire communiquer tous les éléments d'un environnement industriel, tels que les machines, les produits en cours de fabrication, les fournisseurs, les clients, les collaborateurs et les infrastructures, à l'aide de capteurs, d'actionneurs et d'autres dispositifs d'instrumentation. Ces objets échangent des données en temps réel, qui sont ensuite acheminées à travers un réseau local ou sur internet. L'IIoT permet des gains de productivité et d'efficacité opérationnelle pour l'industrie, ainsi que la possibilité d'adapter les compétences disponibles en temps réel pour faire face à des évolutions rapides ou des imprévus. Les informations issues de l'IIoT créent de la connaissance sur les clients, l'environnement et les processus de l'entreprise, ce qui constitue une valeur ajoutée pour l'entreprise en lui permettant de faire des prédictions sur l'évolution de leur produit afin de renforcer sa disponibilité et sa durabilité [30]. L'IIoT constitue ainsi la quatrième révolution industrielle, appelée Industrie 4.0 ou Usine 4.0 dont le principe est illustré à la figure 2.4.

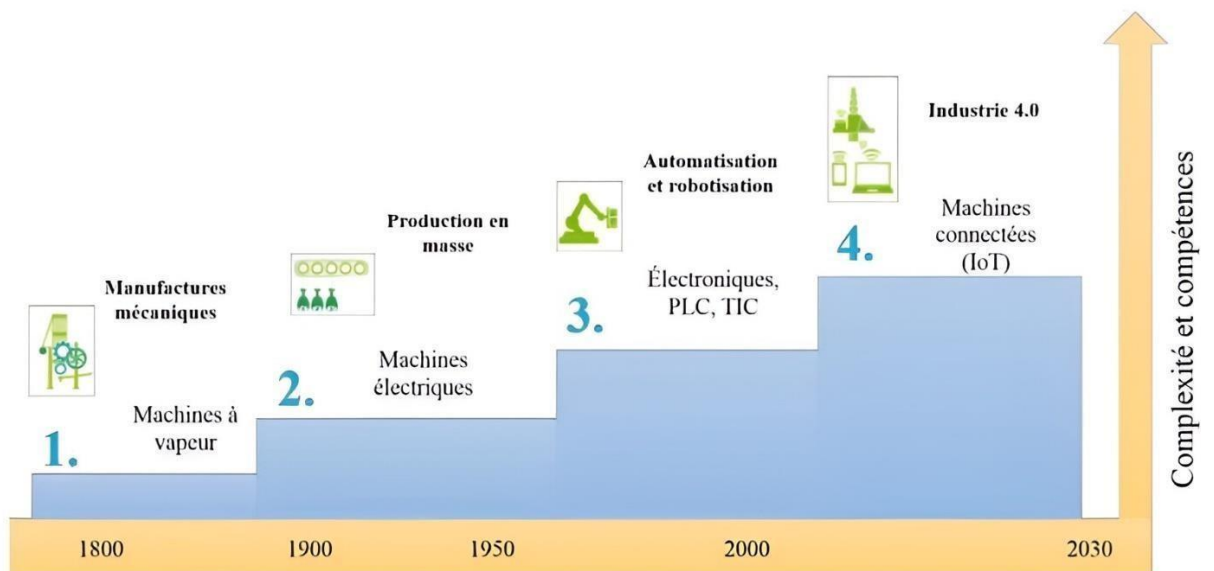


Figure 2.4. Évolution de l'industrie [52].

Les avantages de l'Industrie 4.0 (IIoT) incluent l'optimisation de la consommation d'énergie, la surveillance et le contrôle en temps réel des machines et équipements, l'introduction de procédés intelligents, l'optimisation de la Supply Chain, l'élimination du papier en numérisant les processus de l'usine, et le renforcement de la valeur des produits existants en développant de nouvelles gammes de produits intelligents. Le choix des stratégies de communication est très important pour garantir un échange de données efficace, et une meilleure intégration de l'Industrie 4.0 consiste à déterminer le type de système embarqué adapté au milieu physique de propagation, à s'assurer de la qualité des informations échangées et à le rendre interopérable avec l'environnement de l'usine. Les données de volume important sont stockées et traitées dans le Cloud, ce qui implique de traiter des problématiques de sécurité auxquelles on peut remédier en implémentant des principes de cyber sécurité tels que le concept d'Edge computing [30].

Cependant, il existe une nouvelle vision pour l'industrie appelée Industrie 5.0. L'industrie 5.0 est en effet un concept émergent qui vise à combiner les avantages des technologies de l'industrie 4.0 avec une approche humaine. Contrairement à l'industrie 4.0, qui se concentre sur l'automatisation complète et la numérisation des processus de fabrication. L'industrie se concentre sur la collaboration entre les machines et les humains, une automatisation plus avancée et l'utilisation grandie de l'intelligence artificielle (IA), de l'analyse de données et de la robotique. Cela peut également impliquer une plus grande personnalisation des produits pour répondre aux besoins individuels des clients. Il est important de noter que l'industrie 5.0 n'est pas encore une réalité concrète, et il reste à voir si cette évolution de l'industrie se produira dans un avenir proche.

### **2.3.1 Quelques applications de l'IIoT**

IIoT ouvre la voie à une meilleure compréhension du processus de fabrication, permettant ainsi une production efficace et durable. Elle permet par exemple de détecter les pièces défectueuses, de mesurer la qualité d'un produit en bout de chaîne (détection de défauts).

Yang et al. [53] recensent quelques applications de l'IoT en milieu industriel. Nous allons en voir quelques-unes :

#### **2.3.1.1 Gestion de l'énergie**

L'IoT (Internet des objets) apporte des nouvelles perspectives pour l'industrie, notamment en ce qui concerne la gestion de l'énergie. Grâce à l'IoT, il est possible d'avoir une gestion active et en temps réel de l'alimentation des équipements.

- En installant des capteurs connectés aux équipements industriels pour mesurer leur consommation d'énergie en temps réel. Ces données peuvent ensuite être analysées pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les coûts et optimiser la consommation d'énergie [54].
- De plus, en organisant les périodes d'activité et de veille des équipements industriels de manière prévisible, il est possible d'optimiser l'efficacité énergétique de manière significative [55]. Cette approche peut entraîner des gains importants en matière d'efficacité énergétique, et elle peut également permettre de réaliser des économies non négligeables lorsqu'elle est appliquée à grande échelle.

#### **2.3.1.2 Maintenances préventives**

Nous avons constaté la possibilité d'améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et un autre élément clé consiste à réduire au minimum les temps d'arrêt des équipements. La maintenance préventive est une solution efficace, mais elle doit être effectuée au moment opportun pour éviter les coûts inutiles. Pour cela l'Internet des Objets Industriels (IIoT) implique l'utilisation de capteurs pour collecter des données en temps réel sur les performances des équipements. Ces données sont ensuite analysées à l'aide d'algorithmes d'analyse prédictive pour détecter les signes avant-coureurs de défaillance [56]. En outre, l'utilisation de l'IIoT permet aux entreprises de surveiller plusieurs équipements à distance et de manière simultanée

permettant aux entreprises peuvent détecter les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent des grandes pannes. De plus, la maintenance prédictive permet de remplacer les pièces usées avant qu'elles ne causent des pannes réduisant ainsi les coûts de réparation et de remplacement, augmenter le temps de fonctionnement des équipements, ce qui peut augmenter la productivité globale de l'entreprise

### 2.3.1.3 Automatisation

L'automatisation dans l'IIoT (Industrial Internet of Things) repose sur l'utilisation de capteurs et de dispositifs connectés pour collecter des données en temps réel sur les équipements et les processus industriels. Ces données sont ensuite analysées et utilisées pour automatiser les processus de production, de maintenance et de gestion afin d'optimiser les opérations et améliorer l'efficacité et la qualité globale de l'entreprise. L'automatisation dans l'IIoT peut également être utilisée pour [57] :

- Surveiller en temps réel l'état des équipements et détecter les signes avant-coureurs de défaillance grâce aux données collectées par les capteurs. Cette approche permet de planifier la maintenance préventive de manière proactive et donc éviter les temps d'arrêt imprévus et les coûts associés que nous avons déjà examinés.
- Optimiser les processus de production en temps réel. Les données collectées par les capteurs peuvent être utilisées pour ajuster automatiquement les paramètres des équipements, tels que la température, la pression ou la vitesse, afin d'optimiser l'efficacité et la qualité de la production.
- En outre, gérer les opérations logistiques et les chaînes d'approvisionnement en temps réel, en utilisant des capteurs pour suivre l'emplacement et le mouvement des marchandises à travers les entrepôts et les usines.

### 2.3.2 Les défis de l'IIoT

L'Internet Industriel des Objets (IIoT) est un réseau de dispositifs intelligents interconnectés qui sont utilisés dans des environnements industriels. Bien que l'IIoT présente de nombreux avantages pour les entreprises, il y a également plusieurs défis qui doivent être pris en compte, notamment :

- **Connectivité et visibilité** : en raison d'une connectivité mauvaise ou inappropriée, les défis de mise en œuvre de l'IIoT se posent. La connexion des machines à l'IIoT est complexe et nécessite un niveau de performance optimal pour maximiser la production. La coordination entre différentes unités responsables du bon fonctionnement des machines IIoT peut être affectée par des pannes de courant, des pannes d'Internet et des erreurs physiques ou techniques [36], ce qui peut entraîner le retrait des appareils connectés du réseau. Cette interruption peut avoir des conséquences graves pour l'unité de production et l'entreprise en subit les conséquences financières considérables.

- **Intégration IIoT** : la mise en place de l'IIoT rencontre des difficultés liées à l'intégration des technologies de l'information (IT). Cette intégration rencontre des problèmes de connectivité et de synchronisation, en raison des différences de protocoles, de langages de programmation, de normes de sécurité, de structures de données, etc. Les entreprises doivent s'assurer que les systèmes intégrés et IIoT sont compatibles et interopérables, cela nécessite souvent des investissements en temps, en argent et en ressources pour assurer que les données sont transférées et traitées en toute sécurité et efficacement [37].
- **Sécurité** : L'IIoT nous apporte de nombreux avantages, mais il est important de prendre en compte la sécurité et la confidentialité lors de l'utilisation de dispositifs intelligents pour garantir la protection de nos données personnelles et de notre bien-être physique [38]. La sécurité doit être une priorité lors de la conception d'appareils IoT. Cependant, la sécurité représente un défi majeur pour l'équipe technologique IIoT en raison de la limitation des capacités des dispositifs IoT, qui ont des limites en termes de puissance de traitement, de mémoire, de batterie et de bande passante, ne peuvent pas se protéger efficacement contre les attaques [35].
- **Stockage de données** : Le stockage de données représente aussi un défi important pour les entreprises, en raison de la grande quantité de données générées par les systèmes IIoT. Les dispositifs IIoT peuvent générer des quantités massives de données, souvent en temps réel, qui doivent être stockées de manière sécurisée et accessible pour une utilisation future. Cela peut entraîner des défis de stockage, de gestion et de traitement des données, en particulier pour les entreprises qui n'ont pas encore investi dans des infrastructures de stockage de données avancées [39].

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le concept d'internet des objets (IoT), et l'internet des objets industriel (IIoT) en particulier. Dans le chapitre suivant, Nous allons discuter et proposer des méthodes, stratégies et des solutions qui prennent en charge l'intégration IoT et PLM (Product Lifecycle Management) dans l'industrie notamment en maintenance.

# Chapitre 3

## Intégration de l'IIoT et du PLM dans l'industrie

### 3.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons abordé le concept de gestion du cycle de vie des produits (PLM) et son rôle crucial. Nous avons également examiné les concepts d'Internet des Objets (IoT) et leurs applications dans divers secteurs industriels, ce qui nous a permis de comprendre l'importance de l'intégration de l'IIoT dans un système PLM pour améliorer l'efficacité et la compétitivité des entreprises. La gestion du cycle de vie d'un produit est une tâche complexe qui englobe différentes phases, depuis la conception initiale jusqu'à l'élimination finale. Chaque phase de ce cycle présente des défis uniques et nécessite une approche planifiée pour assurer un fonctionnement optimal du produit tout au long de sa durée de vie. Dans notre travail, nous comprenons que gérer toutes les étapes de vie d'un produit peut être une tâche difficile et ambitieuse. C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer spécifiquement sur la maintenance des outils de production, une partie essentielle de ce cycle.

L'intégration de l'IIoT dans un système PLM est devenue une tendance croissante dans de nombreuses industries, en particulier pour améliorer la maintenance préventive. Les capteurs IIoT permettent la collecte de données en temps réel sur les performances des machines, tandis que l'analyse prédictive peut être utilisée pour prévoir les pannes futures. En intégrant ces données IIoT dans le système PLM, les entreprises peuvent développer des modèles prédictifs pour anticiper les pannes et planifier la maintenance de manière plus efficace.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par une présentation générale de la maintenance, puis nous allons nous concentrer spécifiquement sur l'intégration de l'IIoT dans un système de gestion du cycle de vie des produits (PLM). Ensuite, le reste du chapitre sera consacré à la gestion de maintenance basée sur l'intégration de l'IIoT et du PLM.

### 3.2 Définition de la maintenance

La maintenance est l'ensemble des actions techniques, administratives et de management visant à maintenir, réparer, prévenir les pannes et assurer le bon fonctionnement d'un équipement, d'un système ou d'une installation. Elle comprend des activités de surveillance, de dépannage, de réparation, de remplacement et de mise à jour [70]. L'objectif principal de la maintenance est d'assurer la disponibilité, la fiabilité, la continuité de marche et la qualité de production.

### 3.2.1 Les objectifs de la maintenance

Dans une entreprise, quel que soit son type et son secteur d'activité, le rôle de la fonction maintenance est d'assurer la disponibilité maximale et une meilleure performance des équipements de production à un coût optimal [67] [69].

Les principaux objectifs que doit se fixer la fonction maintenance sont :

- **Maximiser la disponibilité du matériel** : La maintenance vise à assurer que les machines sont disponibles et opérationnelles lorsque cela est nécessaire pour la production. Cela implique d'effectuer des actions préventives et correctives pour minimiser les temps d'arrêt non planifiés.
- **Prolonger la durée de vie des machines** : En appliquant des stratégies de maintenance appropriées, il est possible de prolonger la durée de vie des machines industrielles. Cela peut inclure des actions de maintenance préventive, telles que l'entretien régulier, le remplacement de pièces usées et la surveillance de l'état des machines.
- **Optimiser les performances du matériel** : Une maintenance efficace permet d'optimiser les performances des machines industrielles en assurant leur bon fonctionnement et en évitant les perturbations dans les processus de production. Cela peut conduire à une augmentation de la productivité, de la qualité des produits et de l'efficacité globale de l'entreprise.
- **Garantir la qualité des produits** : La surveillance quotidienne des machines est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglages et de fonctionnement soient respectés. Le contrôle des vibrations et les températures de la machine permet d'éviter les dysfonctionnements et d'assurer la qualité des produits.
- **Améliorer la gestion des stocks** : La maintenance est prévisible, donc elle connaît les échéances de remplacement des pièces et facilite ainsi la gestion des stocks. Cela permet également d'éviter de stocker des pièces inutilement et de les commander uniquement lorsque le besoin se présente.
- **Optimiser les coûts de maintenance** : La maintenance efficace des machines industrielles permet de réduire les coûts liés aux réparations, aux remplacements de pièces et aux temps d'arrêt non planifiés. Cela peut être réalisé grâce à une planification adéquate des activités de maintenance et à l'utilisation de techniques appropriées.
- **Assurer la sécurité des travailleurs** : La préparation des interventions de maintenance ne se limite pas à respecter le planning, elle doit également prendre en compte les critères de sécurité pour éviter les accidents imprévus. Pour garantir cette sécurité, il est essentiel de réaliser la maintenance des machines industrielles de manière à minimiser les risques d'accidents causés par des défaillances de machines. Cela implique de s'assurer que les machines respectent les normes de sécurité, de réaliser des inspections régulières et de former le personnel aux mesures de sécurité appropriées.

## 3.2.2 Types de maintenance

La maintenance des équipements constitue une contrainte réglementaire pour les entreprises qui possèdent des matériels utilisés par leurs employés. L'entreprise a la possibilité de choisir la manière dont cette maintenance sera effectuée (en interne ou en externe, planifiée ou non). Ce choix implique des considérations techniques, organisationnelles et économiques. Il doit répondre aux besoins des utilisateurs des équipements et de production en général [61].

Le diagramme ci-dessous illustre les différents types de maintenance accessibles à une entreprise :

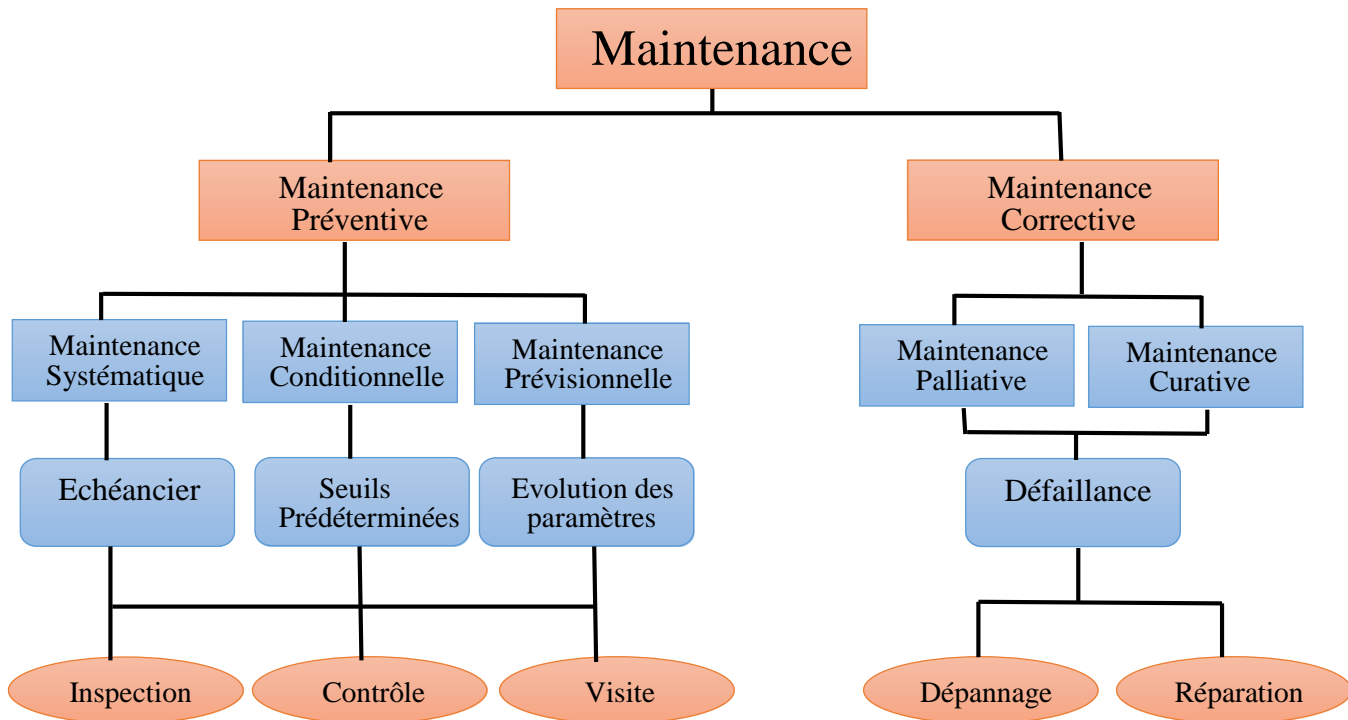


Figure 3.1. Types de maintenance [70].

### 3.2.2.1 Maintenance corrective

C'est une opération de maintenance effectuée après une panne ou une défaillance. Elle consiste à réparer ou à remplacer les composants défectueux pour rétablir le fonctionnement normal de l'équipement [60] [62].

La maintenance corrective peut être :

- ✓ Palliative
- ✓ Curative



### **3.2.2.1.1 Maintenance palliative (dépannage)**

Ce sont des activités de maintenance corrective visant à rétablir temporairement tout ou partie des fonctions requises d'un équipement qui a mal fonctionné. Appelé couramment dépannage. Elle se compose principalement d'actions provisoires qui doivent être suivies d'actions correctives pour résoudre définitivement le problème [60] [63].

### **3.2.2.1.2 Maintenance curative (réparation)**

La maintenance corrective curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour réparer un équipement de façon définitive. Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent [60] [62].

### **3.2.2.2 Maintenance préventive**

C'est une maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un équipement ou d'un service rendu [64]. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation.

La maintenance préventive peut être :

- ✓ Systématique
- ✓ Conditionnelle
- ✓ Prévisionnelle

Les objectifs de la Maintenance Préventive sont les suivants :

- ✓ Augmenter la durée de vie des matériels.
- ✓ Diminuer la probabilité des défaillances en service. ✓ Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- ✓ Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant.
- ✓ Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- ✓ Supprimer les causes d'accidents graves. ✓ Diminuer le budget de maintenance.

#### **3.2.2.2.1 Maintenance systématique**

L'opération de maintenance est effectuée selon un échéancier établi selon le temps (à périodicité temporelle fixe) ou le nombre d'unités d'usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc.) mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète [60] [65]. Cette méthode nécessite de connaître le comportement du matériel, les modes de dégradations et le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries... etc.

Cette méthode de maintenance s'applique dans les cas suivants :

- ✓ Équipements soumis à une réglementation sécuritaire : ponts roulants, matériels d'incendie, installations sous pression...etc.
- ✓ Équipements ayant un coût de défaillance très élevés : système avec processus de production continu, lignes de fabrication automatisées...etc.
- ✓ Équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : matériels de transport en commun des personnes, appareils et constituants utilisés dans l'énergie nucléaire...etc.

### **3.2.2.2 Maintenance conditionnelle**

La maintenance préventive conditionnelle consiste à effectuer des interventions de maintenance en fonction d'événements prédéterminés tels que l'autodiagnostic, les informations des capteurs ou les mesures. Ce type de maintenance permet de surveiller en continu les équipements en service et de prendre des décisions d'intervention lorsque des preuves expérimentales de défaillance imminente ou de seuil de dégradation préétabli sont détectées [60].

Elle s'applique particulièrement aux pannes spécifiques, tels que les défaillances qui surviennent progressivement. L'étude des dérives dans le cadre de la maintenance préventive permet de détecter les seuils d'alerte, que ce soit dans les technologies mécaniques ou électroniques [66].

### **3.2.2.3 Maintenance prévisionnelle ou prédictive**

La maintenance prévisionnelle, également connue sous le nom de maintenance prédictive, implique la surveillance continue de l'évolution du niveau de dégradation d'un équipement pour retarder ou avancer les interventions afin de prévenir les dysfonctionnements [60].

La maintenance prédictive utilise des techniques avancées de surveillance et de diagnostic pour prévoir les pannes ou les défaillances potentielles. Elle repose sur l'analyse en temps réel des données collectées sur l'état des équipements ou des systèmes. Ces données comprennent des paramètres tels que le niveau et la qualité de l'huile, les températures et les pressions, la tension et l'intensité des matériels électriques et les vibrations, ainsi que toute autre manifestation directe ou indirecte de la dégradation [66].

L'objectif de la maintenance préventive prévisionnelle est d'anticiper les pannes et d'effectuer les réparations nécessaires avant qu'une grande défaillance ne survienne. Cette approche peut être appliquée à tous les types de matériels. L'utilisation d'outils informatiques permet d'améliorer considérablement son efficacité, mais elle est généralement coûteuse.

### 3.3 Un aperçu des recherches actuelles sur Intégration de l'IoT et du PLM

Ces différents articles de recherche abordent la question de l'intégration de l'Internet des objets (IoT) dans la gestion du cycle de vie des produits (PLM). Chacun de ces articles propose des perspectives différentes sur la façon dont l'IoT peut être utilisé pour améliorer le PLM, mais ils présentent également certaines limites.

L'article de Kunz et al. (2010) se concentre sur l'utilisation de l'IoT, plus précisément la technologie RFID, comme source d'informations pour la gestion du cycle de vie des services. Cependant, il se limite à la RFID et ne couvre pas l'ensemble des capacités de détection de l'IoT [82]. Kiritsis (2011) présente un cadre et des cas d'utilisation théoriques pour l'IoT, mais se concentre principalement sur les produits intelligents et les technologies disponibles à l'époque, en particulier la RFID [80]. Wuest et al. (2012) font une analogie entre Facebook et le PLM pour les produits intelligents, mais ils ne fournissent pas de preuves sur la façon dont les informations sur les produits peuvent être agrégées pour constituer des données pouvant être utilisées tout au long du cycle de vie [83]. Luo et al. (2012) évaluent la faisabilité de l'intégration du PLM et de l'IoT, mais se limitent à l'utilisation de la technologie RFID basée sur EPCglobal pour les besoins d'identification et de traçabilité des produits [84]. Framing et al. (2014) proposent une voie vers un standard pour l'interaction avec les produits IoT et intelligents, mais ce standard appelé QLM n'a pas atteint la phase de normalisation à ce jour [85]. Ren et Zhao (2015) présentent une architecture pour l'utilisation des données IoT et PLM dans les processus de recherche et fabrication, ainsi que dans l'exploitation et la maintenance des produits. Cependant, il manque une démonstration concrète de la faisabilité de leur proposition [86]. Duan et al. (2015) décrivent le cycle opérationnel du produit (POC) comme étant le PLM du milieu de vie d'un produit, principalement basé sur l'IoT. Cependant, ils ne se positionnent pas sur les plateformes IoT actuellement disponibles [87].

Hribernik et al. (2016) abordent les informations d'utilisation des produits où l'IoT est l'une des sources de données, mais ne donnent aucun détail sur l'intégration de ces données dans le PLM [88]. Lewandowski et Thoben (2016) explorent la réutilisation des fonctionnalités des réseaux sociaux pour relever les défis du PLM et de l'IoT. Ils montrent l'applicabilité de ces concepts à l'IoT et à son intégration dans le PLM, mais aucun travail concret n'a été trouvé à ce sujet [89]. Shariatzadeh et al. (2016) suggèrent de relier l'instance physique d'un produit à l'instance numérique via l'IoT, soulignant la complémentarité des solutions PLM et IoT. Cependant, ils ne fournissent pas suffisamment de preuves concrètes de la mise en œuvre technique réelle [90]. Thoben et Lewandowski (2016) décrivent la contribution potentielle de l'IoT à toutes les phases du cycle de vie du produit, de l'exploitation et la maintenance à la conception et au développement [91]. Kim et al. (2017) utilisent uniquement la RFID comme technologie IoT, principalement pour les phases de fin de vie et de milieu de vie des produits [92]. Zhou et al. (2017) proposent une optimisation pour mesurer les changements organisationnels liés à l'IoT, mais ne décrivent pas comment les deux systèmes sont intégrés ni comment le PLM existant est transformé pour intégrer l'IoT [93].

Sodro et al. (2018) proposent une intégration de l'IoT et du PLM dans le domaine médical, mais se concentrent principalement sur la gestion de la batterie et ne développent pas la

proposition d'intégration des deux systèmes de manière approfondie [94]. Kumar et al. (2019) reconnaissent la limite entre l'IoT et le PLM, mais proposent une vision méta axée sur les parties prenantes sans aborder les questions d'intégration [95]. Liu et al. (2020) proposent de lier l'IoT et le PLM en utilisant la technologie de la blockchain pour stocker toutes les informations. Cependant, étant donné les spécificités propres à chaque domaine, il semble peu probable que cette approche puisse fonctionner de manière efficace [96]. Yousefnezhad et al. (2020) décrivent l'intégration des données de l'IoT dans le PLM, mais ne fournissent pas de détails sur la manière dont cela a été réalisé [97]. Labbi et Ahmadi (2021) intègrent également des données de production et de produit dans le PLM, mais ne détaillent pas le processus d'intégration [98]. Globalement, ces articles théoriques montrent que l'intégration des données de l'IoT dans le PLM est une question d'intérêt, mais ils ne fournissent pas suffisamment de détails ou de preuves concrètes sur la façon dont cette intégration peut être réalisée.

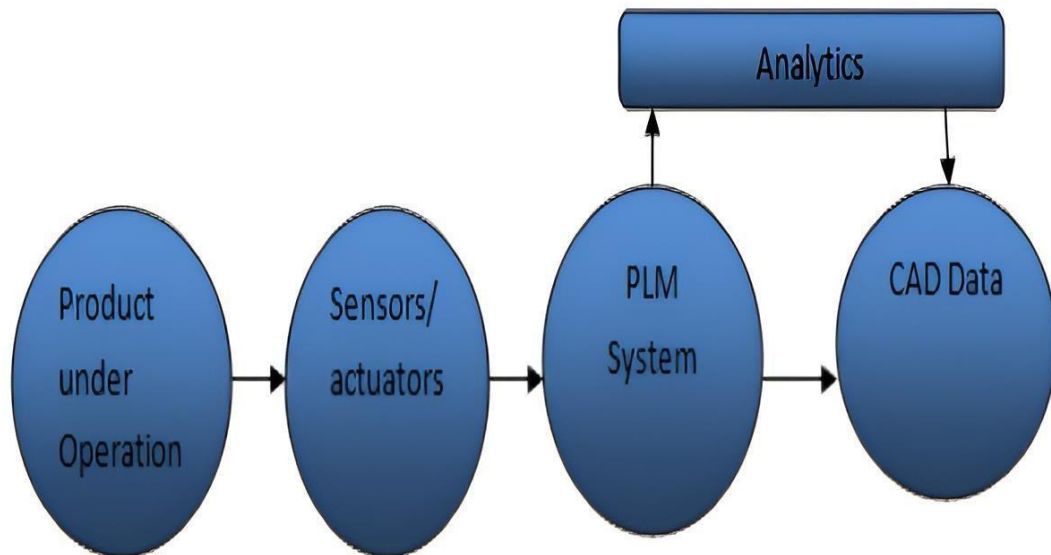
Dans le cadre de cette étude, notre objectif est de présenter une approche concrète pour intégrer les données de l'Internet des objets (IoT) dans le Product Lifecycle Management (PLM), tout en mettant en évidence les défis et en fournissant des démonstrations pratiques. Nous reconnaissons que de nombreux travaux de recherche ont abordé cette question, mais la plupart d'entre eux se sont limités à des solutions théoriques sans décrire en détail la méthode d'intégration. Dans notre étude, nous cherchons à combler cette lacune en proposant une méthodologie claire et en fournissant des exemples concrets de la façon dont les données IoT peuvent être utilisées dans le cycle de vie des produits. Nous mettrons en place une démonstration pratique pour illustrer comment les données IoT peuvent être efficacement intégrées dans le PLM (Chapitre 4). En résumé, cette étude vise à combler le fossé entre la théorie et la pratique en montrant de manière concrète comment les données IoT peuvent être intégrées dans le PLM.

### **3.4 Système PLM basé sur L'IoT**

Les objectifs de développement durable des Nations Unies visent à un avenir meilleur et plus durable pour tous. L'objectif d'ici 2030 est de moderniser les infrastructures et les industries afin de les rendre durables, en utilisant les ressources de manière plus efficace et en adoptant davantage de technologies et de processus industriels propres et respectueux de l'environnement, tous les pays prenant des mesures en fonction de leurs capacités respectives.

Cependant, la modernisation de l'industrie est aujourd'hui limitée par la fragmentation du fil numérique, c'est-à-dire la capacité de réutiliser les mêmes données ou informations du début à la fin du cycle de vie d'un produit sans avoir besoin de les copier manuellement ou de les recréer. En effet, les informations sur le développement des produits sont rarement utilisées dans les phases ultérieures du cycle de vie d'un produit [3]. Ce qui a été remarqué, c'est que les entreprises n'englobent le cycle de vie complet du produit que s'il existe une exigence réglementaire : installations nucléaires, constructeurs d'avions, etc. Sinon, les entreprises se concentrent sur les premières étapes du cycle de vie d'un produit sans recueillir aucune information sur les phases d'utilisation et d'entretien de la vie du produit, sans parler du rejet et/ ou du recyclage du produit (Ce que nous avons précédemment vu dans le chapitre 1). En fait, le problème reste assez simple : les entreprises n'ont aucun moyen simple de produire ces données ou de les obtenir d'une source externe. Même ainsi, ils ne savent parfois pas quoi en faire et comment cela pourrait les aider car la quantité de données est souvent perçue comme écrasante ou insuffisante [3].

Néanmoins, l'émergence actuelle de l'Internet des objets (IoT) est annoncée comme étant un changement fondamental. Dans le domaine industriel, l'IoT peut être intégré à toutes les étapes du processus de travail. L'avantage de l'IoT est que les responsables peuvent suivre et contrôler à distance chaque processus de l'unité de fabrication, et obtenir des informations sur la fréquence de défaillance d'un équipement spécifique, ce qui facilite la prise de décisions efficaces concernant cet équipement.



**Figure 3.2.** IoT avec un système PLM [99]

La figure 3.2 montre l'IoT avec le système PLM. Les capteurs attachés aux équipements collectent des données qui sont ensuite transmises au système PLM [99]. Le système PLM traite ces données en temps réel, ce qui permet aux responsables de prendre les meilleures décisions pour la modification de la conception et de suivre la fonctionnalité du produit en cas de surcharge. Grâce à l'intégration du PLM avec l'IoT, le fournisseur peut améliorer sa conception en se basant sur les données collectées précédemment par les capteurs. Cela est bénéfique à la fois pour le fournisseur de CAD (Computer Aided Design en anglais) (Conception Assistée par Ordinateur en français, ce que nous avons précédemment vu dans le chapitre 1) et pour l'organisation elle-même [99].

En effet, la collecte de données devient de plus en plus facile grâce à l'IoT [80]. Par conséquent, les entreprises seront de plus en plus encouragées à prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, tant d'un point de vue économique que de la responsabilité environnementale. D'ailleurs, l'analyse du cycle de vie est en train de se développer en tant que discipline et devra bientôt être intégrée dans le système d'information global de l'entreprise [81].

### **3.4.1 Optimisation de la prise de décision de maintenance en temps réel grâce à l'intégration de l'IoT et du PLM**

Au cours de l'utilisation quotidienne d'un produit, les données d'utilisation peuvent être recueillies pour servir de source importante d'informations MOL (qui ont été mentionnés précédemment dans le chapitre 1). Après un certain temps d'utilisation, le produit peut nécessiter deux types d'entretien. L'un est la maintenance corrective lorsque le produit ne fonctionne pas correctement en raison d'une défaillance de composants ou d'une autre cause. L'autre est la maintenance prédictive effectuée dans le cadre d'un programme de maintenance régulier alors que le produit est toujours en bon état de fonctionnement [100]. Dans notre travail, nous nous concentrons sur la maintenance prédictive, car elle représente une méthode efficace pour économiser du temps et de l'argent tout en évitant les pannes d'équipement imprévues dans le processus de fabrication. Nous prenons principalement des décisions basées sur les événements anormaux liés au produit, tels que des températures ou des vibrations inhabituelles de la machine. La maintenance prédictive est très importante dans le PLM. Elle permet aux fabricants de déterminer l'état du produit en service et d'anticiper le moment optimal pour effectuer la maintenance. Nous considérons que c'est une approche efficace pour économiser du temps et de l'argent tout en évitant les pannes d'équipement inattendues lors de la fabrication.

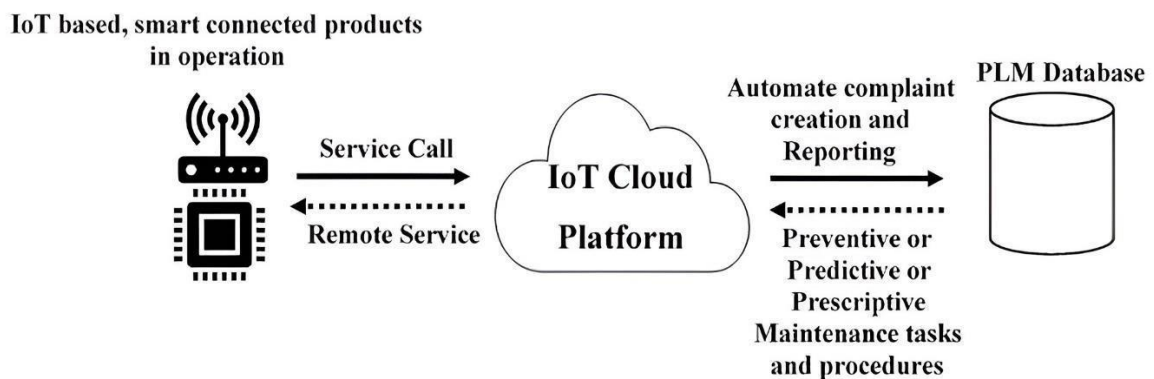
Cependant, pendant MOL et EOL (qui ont été mentionnés précédemment dans le chapitre 1), en raison de la propriété du produit de client et il n'y a pas de système de support d'information correspondant, les données se décomposent presque après la livraison du produit au client. En conséquence, les acteurs impliqués dans chaque étape du cycle de vie ont pris des décisions basées sur des informations incomplètes et inexacts sur le cycle de vie du produit d'autres phases, ce qui a conduit à des inefficacités opérationnelles [100]. Cela entrave la mise en œuvre d'une gestion du cycle de vie. Heureusement, avec le développement rapide des technologies de l'information et de la communication, en particulier les technologies sans fil telles que l'identification par radiofréquence (RFID), les capteurs et les étiquettes intelligentes (qui ont été mentionnés auparavant dans le chapitre 2). On pense que ces technologies avancées offrent une perspective prometteuse qui permet aux acteurs du cycle de vie de suivre et d'analyser les données du cycle de vie des produits et de prendre des décisions efficaces sans contraintes spatiales et temporelles [101].

### **3.4.2 Planification de maintenance basée sur l'intégration de l'IIoT et du PLM**

Selon Gartner, l'IIoT (Internet Industriel des Objets) est considérée comme l'application la plus commerciale de l'IoT [102]. Cette technologie, également connue sous le nom d'Industrie 4.0 ou quatrième révolution industrielle, se concentre sur l'automatisation et l'interconnexion des données dans les technologies industrielles, telle que mentionnée dans le chapitre 2 précédent.

L'Industrie 4.0 peut ouvrir la voie au suivi en temps réel des systèmes de fabrication. La surveillance en temps réel d'un produit va entraîner la génération de grandes quantités de données, ce qui va créer à son tour un besoin d'utiliser Big Data Analytics tout au long du cycle de vie du produit. L'utilisation de Big Data Analytics est capable de fournir des services de produits personnalisés et précis ainsi que d'améliorer la qualité [103]. L'utilisation de la gestion

du cycle de vie des produits (PLM) a été proposée comme source de données pour Big Data Analytics [104]. Les données PLM peuvent également prendre en charge l'analyse des causes profondes d'un produit grâce à l'intégration des informations de maintenance [105]. On observe que les systèmes PLM actuels ne sont pas capables d'intégrer des données de retour d'expérience tout au long du cycle de vie d'un produit en raison de la grande quantité de données et de la difficulté d'adaptation des solutions PLM disponibles [106]. Ainsi, le rôle d'un PLM dans le cycle de vie d'un produit est complet lorsqu'il peut recevoir un retour direct (en temps réel) du domaine dans lequel le produit est en cours d'exploitation. Un concept de système qui intègre l'IoT et le PLM pour atteindre le même objectif est illustré à la Figure 3.3.



**Figure 3.3.** Un concept de système pour l'intégration de l'IoT et du PLM [99].

La révolution 4.0 représente un grand défi pour mettre en place une interconnexion entre les processus existants. Son objectif est d'utiliser la technologie comme un lien entre les machines, les opérations, les équipements et les personnes. Grâce à ces avancées technologiques, la maintenance industrielle devient plus simple et permet un contrôle et une surveillance plus faciles des opérations [71].

L'innovation est essentielle pour améliorer l'efficacité et la réactivité du service de maintenance. Les capteurs, l'Internet des objets (IoT), le Big Data et d'autres systèmes intelligents permettent une détection rapide des défaillances, une évaluation des équipements, une évaluation de leur impact sur la productivité et la mise en place d'un plan de maintenance préventive optimal pour minimiser les pannes. Il est donc important d'optimiser le plan de maintenance de l'entreprise afin de réduire les risques et les pertes.

Dans le contexte de la maintenance industrielle 4.0, les tâches traditionnellement effectuées par des techniciens spécialisés dans la collecte de données sur l'état des machines peuvent désormais être effectuées par des machines elles-mêmes. Cela permet de maximiser la durée de vie des composants des machines et d'éviter les pannes. Les données sont désormais au service des humains, et non l'inverse. Les processus de maintenance évoluent d'un modèle préventif à un modèle prédictif, passant de la prévention à la prévision [72].

Parmi les avantages de cette nouvelle ère numérique, on peut citer le suivi des investissements et du rendement des équipements, l'amélioration de la communication et la visibilité de l'entreprise sur le marché [71].

## **3.5. Stratégies d'intégration de l'IIoT dans la gestion de la maintenance du PLM**

L'intégration de l'IIoT dans la gestion de la maintenance du PLM offre des opportunités de transformation et d'optimisation pour les entreprises manufacturières. En combinant les technologies numériques avec les pratiques de maintenance traditionnelles, cette convergence technologique permet d'améliorer l'efficacité, de prédire les défaillances et d'augmenter la productivité.

Voici les différentes manières d'intégrer l'IIoT dans la maintenance PLM :

### **3.5.1 Capteurs de surveillance des équipements**

Des capteurs IIoT peuvent être installés sur des équipements et des machines pour collecter des données en temps réel sur leur fonctionnement. Ces capteurs peuvent mesurer divers paramètres tels que la température, la pression, les vibrations, le niveau de liquide, la consommation d'énergie, etc. Ils permettent de surveiller l'état de l'équipements et d'identifier des anomalies ou des pannes potentielles [79].

### **3.5.2 Connectivité des équipements**

Les équipements industriels tels que les machines, les robots et les outils de production peuvent être interconnectés au sein des réseaux IIoT (Industrial Internet of Things) pour faciliter la collecte de données en temps réel. Cette interconnexion est réalisée grâce à l'utilisation de capteurs de pointe capables de collecter diverses informations sur les performances, l'état et l'environnement de l'équipements [78].

### **3.5.3 Analyse des données en temps réel**

Les données collectées par les capteurs IIoT doivent être analysées en temps réel pour détecter les anomalies et les modèles de performances des équipements. Des algorithmes d'analyse de données en temps réel peuvent être mis en œuvre pour alerter le personnel de maintenance des pannes imminentes ou générer des rapports de performance en temps réel [79]. Par exemple, des modèles prédictifs peuvent être développés pour estimer la durée de vie restante d'un équipement ou prévoir une défaillance imminente.

### **3.5.4 Intégration avec le système PLM**

Les données collectées par les capteurs IIoT peuvent être intégrées dans un système PLM existant. Cela peut être réalisé en développant des interfaces ou des connecteurs spécifiques qui permettent le transfert des données depuis la plateforme IoT vers le système PLM [74]. Les données collectées peuvent être associées aux enregistrements des équipements dans le système PLM pour une visualisation et une analyse ultérieures et utilisées pour suivre l'historique des performances et planifier la maintenance préventive [76].



### **3.5.5 Optimisation des processus de maintenance**

L'IIoT peut aider à optimiser les processus de maintenance en fournissant des informations sur les performances passées des équipements. Ces données peuvent être utilisées pour planifier efficacement les activités de maintenance, optimiser les intervalles d'entretien et minimiser les coûts [75].

### **3.5.6 Maintenance préventive basée sur les données**

L'intégration des données IIoT dans les systèmes PLM permet une planification plus efficace de la maintenance préventive. Les données collectées peuvent être utilisées pour modéliser les performances des équipements, prévoir les intervalles de maintenance et déclencher des alertes lorsque des seuils prédéfinis sont dépassés [79]. Cela permet d'optimiser les opérations de maintenance en évitant les pannes imprévues et en réduisant les temps d'arrêt.

### **3.5.7 Gestion des équipements**

En associant les données de maintenance collectées par l'IIoT aux données du PLM, il est possible d'obtenir une vision globale de la performance des équipements. Cela facilite la prise de décisions concernant la réparation, le remplacement ou l'amélioration des équipements [77], en fonction de leur impact sur le cycle de vie des produits.

### **3.5.8 Gestion des stocks**

L'IIoT peut également être utilisé pour suivre et tracer les équipements et les composants utilisés dans la maintenance de PLM. Cela permet de garantir la conformité aux normes, de faciliter la maintenance des pièces de rechange et d'améliorer la gestion des stocks.

## **3.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné les différentes approches d'intégration de l'IIoT dans un système PLM, notamment dans le contexte de la maintenance. Nous avons étudié comment les capteurs IoT peuvent être utilisés pour collecter des données en temps réel sur les performances des équipements, ainsi que la façon dont ces données peuvent être intégrées dans un système PLM afin de permettre une planification plus efficace de la maintenance préventive. Le chapitre suivant abordera la partie réalisation, expérimentation et les outils utilisés.

# Chapitre 4

## Cas d'étude et implémentation

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons partager notre expérience de stage au sein du complexe GP1Z affilié à Sonatrach et décrire comment nous avons exploré l'importance de la maintenance dans cette entreprise.

Nous allons décrire ensuite notre démarche dans le choix de la maintenance de l'outil de production, en mettant en évidence les raisons pour lesquelles nous avons choisi le compresseur de gaz butane comme cas d'étude. Nous expliquerons comment nous avons obtenu les données IIoT des capteurs placés sur ce compresseur et comment nous les avons intégrées dans la plateforme PLM OpenBOM. En outre, nous présenterons une démonstration pratique de l'IoT en utilisant notre propre capteur.

### 4.2 Expérience au sein du complexe GP1Z

#### 4.2.1 Présentation du complexe GP1Z

Le complexe de traitement du **GPL** (**G**az de **P**étrole **L**iquéfié) dénommé GP1Z ou "JUMBO GPL", fait partie des installations majeures de liquéfaction et l'un des plus importants complexes dans le traitement de GPL en Algérie et dans le monde. Il dépend directement de la division **LQS** (**L**iquéfaction et **S**éparation des **G**az) de l'Activité Aval de l'entreprise nationale SONATRACH.

Le complexe GP1Z a pour objectif le traitement d'une charge GPL Brut en provenance des différents champs situés au Sud Algérien afin de produire du Propane et Butane destinés au marché national et international. Il est dénommé JUMBO-GPL pour ses grandes capacités de production (9 Million Tonnes/an) comme illustré dans le tableau suivant :

**Tableau 4.** Caractéristiques clés du complexe GP1/Z [107].

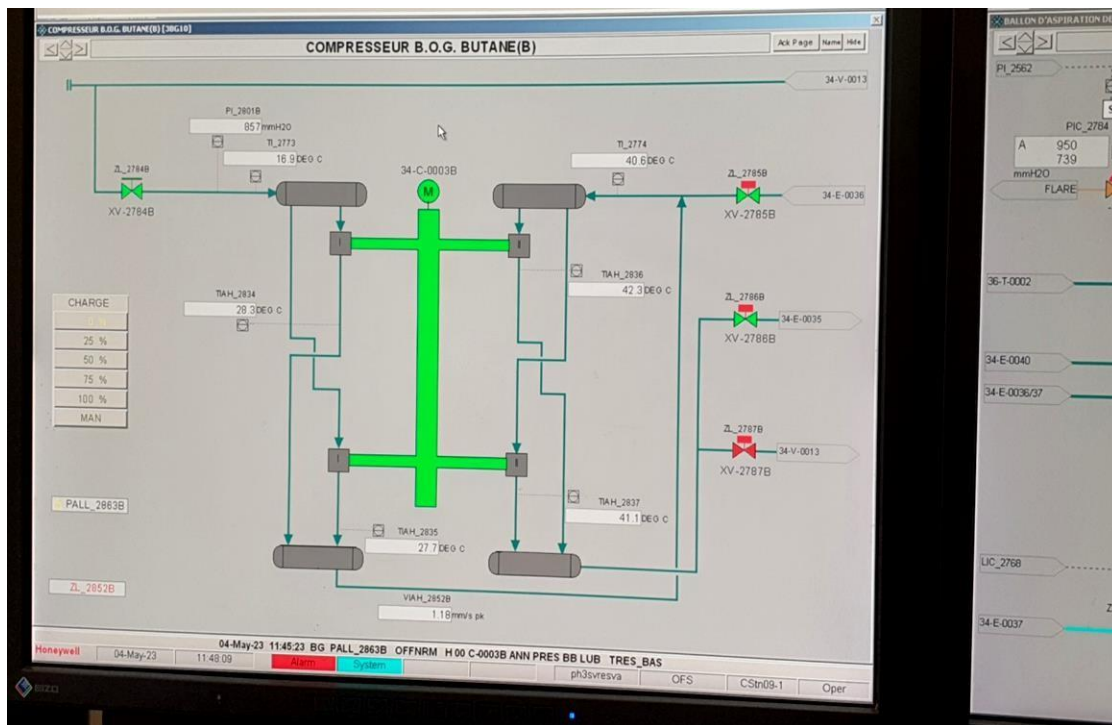
□ Localisation	Mers el Hadjaj (à environ 40 km à l'Est d'Oran).
□ Superficie	120 hectares.
□ Date de mise en production	Décembre 1983.
□ GPL	9 Million Tonnes/an.
□ Nombre de trains	Neuf (09) trains de production.
□ Capacité de stockage	22 Sphères de stockage de la charge 1 000 m <sup>3</sup> chacune 04 Bacs de propane réfrigéré 70 000 m <sup>3</sup> chacun 04 Bacs de butane réfrigéré de 70 000 m <sup>3</sup> chacun 03 sphères de butane ambiant 500 m <sup>3</sup> chacune 01 sphère propane ambiant de 500 m <sup>3</sup> 01 sphère de pentane de 500 m <sup>3</sup>
□ Procédé de liquéfaction utilisé	Distillation Sous Pression.

## 4.2.2 L'importance de la maintenance préventive dans le complexe GP1Z

La quantité énorme de production témoigne du rôle stratégique du complexe au sein de la chaîne de production, commençant par la déshydratation, suivie de la séparation, de la réfrigération et du stockage, jusqu'à la commercialisation des produits finis (propane et butane). Le complexe déploie une expertise technologique avancée et une infrastructure solide pour gérer cette production à grande échelle, ce qui lui confère une position cruciale dans l'industrie du GPL.

En effet, le complexe GP1Z tire parti de systèmes de contrôle avancés pour garantir la production de produits finis (propane et butane) de haute qualité et optimiser les outils de production. Cette utilisation de systèmes de contrôle avancés est étroitement liée à la mise en place d'une maintenance préventive (abordé dans le chapitre précédent) précise et rigoureuse.

Ces systèmes de contrôle comprennent tous les paramètres essentiels nécessaires pour assurer un contrôle efficace, comme illustré dans l'exemple de la Figure 4.1. Ils permettent de surveiller et de maintenir les paramètres du produit lui-même comme la température, la pression et la qualité du butane, ainsi que les paramètres liés aux outils de production, tels que les vibrations et température de compresseur dans notre exemple.



**Figure 4.1.** System de contrôle du compresseur butane GP1Z.

Cette maintenance préventive permet de détecter et de corriger les problèmes potentiels avant qu'ils ne se transforment en pannes majeures, de réduit les temps d'arrêt imprévus et les perturbations dans la production comme nous avons vu dans le chapitre 3. Par conséquent éviter d'importantes pertes financières pouvant atteindre plusieurs millions de dollars.

#### 4.2.2.1. Organisation de la maintenance préventive dans ce complexe

Dans le complexe GP1/Z, la maintenance préventive est une responsabilité partagée entre deux départements : le département technique et le département de la maintenance. Ces départements travaillent en collaboration pour garantir un fonctionnement optimal des équipements et des installations.

##### 4.2.2.1.1 Département maintenance :

Le rôle de ce département est d'entretenir l'équipement du complexe pour le maintenir en bon état en priorité celui de la production. Pour cela il se base sur la performance de différents spécialistes qui occupent les différents services de ce département [114] :

- **Service mécanique** : Il assure l'entretien des différentes machines tournantes : les turbines, les pompes... etc.
- **Service chaudronnerie** : Ce service maintient les équipements statiques :

les colonnes, les vannes,.... etc.

- **Service électricité** : Ce dernier s'occupe de l'entretien de l'énergie électrique et de la rénovation du matériel électrique.
- **Service logistique** : Il assure les travaux de calorifugeage des canalisations et d'autres installations que le transport du matériel et personnel de la maintenance ainsi que quelque intervention en bâtiments.
- **Service planning** : Ce service s'occupe principalement de la planification des opérations de travaux selon leurs natures et de suivre l'exécution des travaux.
- **Service instrumentation** : Son rôle règle et répare l'ensemble des appareils de mesure et d'enregistrement du complexe. Ce service est responsable de garantir que tous les instruments de mesure, tels que les capteurs de température, de vibration, de pression, de débit, etc., fonctionnent correctement et fournissent des données précises.

#### 4.2.2.1.2 Département technique :

Le département technique est réparti en quatre services [114] :

- **Service Etudes et développement** : Ce service est en relation directe avec différents départements du complexe, puisque d'une part il a pour mission d'aboutir à des solutions pour tout problème qui se pose au niveau du complexe et dont chercher la cause, d'une autre part, il étudie, développe des projets en cours et rénove d'autres projets.
  - **Service numérique** : Suite à l'extension de la phase 1 en phase 2 et 3 l'équipe numérique s'est vue en obligation d'améliorer son système de contrôle au niveau du complexe afin de mieux veiller sur les installations. Ce système appelé DCS (Distributed Control system) permet de contrôler et de commander les installations à distance à partir de l'interface en machine (consoles). De ce fait, l'ingénieur système peut modifier, Ajouter ou supprimer une zone sur le site grâce aux données fournies par les différentes salles de contrôle comme :
    - MCR (Main Control Room) : pour la production.
    - LCR (Local Control Room) : pour les bacs, les sphères de stockage et le chargement de navires.
    - CCR (Camion Control Room) : pour le chargement des camions
- **Service Laboratoire** : L'objectif de ce service est le contrôle de qualité des produits finis ainsi que l'analyse des eaux et des huiles utilisées.

- **Service inspection** : La tâche principale de l'inspecteur technique est de détecter et prévenir par divers contrôles toute anomalie afin de minimiser les pannes et les dégâts.

## 4.3 Cas d'étude : la maintenance préventive du compresseur de butane intégrée dans une plateforme PLM

### 4.3.1 Compresseur de butane dans GP1Z

Notre étude se focalise sur la maintenance préventive des outils de production plutôt que des produits eux-mêmes. Dans ce contexte, nous avons sélectionné le compresseur de butane comme principal objet d'étude.



**Figure 4.2.** Compresseur de butane dans GP1Z.

Le compresseur de butane joue un rôle très important dans le processus de production du complexe GP1Z. Il est chargé de comprimer le butane à des niveaux spécifiques pour faciliter son stockage, son transport et sa distribution ultérieure. Étant donné l'importance de ce compresseur dans le flux de production, il est essentiel de mettre en place une maintenance préventive régulière pour assurer son bon fonctionnement. Cela implique notamment l'utilisation des capteurs IIoT comme nous avons abordé dans les chapitres 2 et 3, en particulier les capteurs de vibrations et de température illustrés dans les Figures 4.3 et 4.4 ci-dessous.



**Figure 4.3.** Capteur de Vibration du compresseur



**Figure 4.4.** Capteur de Température du compresseur

#### **4.3.1.1 Capteur de vibration**

Les capteurs de vibrations sont conçus pour détecter les vibrations excessives qui pourraient indiquer un désalignement, une usure excessive ou d'autres problèmes mécaniques. En cas de détection de vibrations anormales selon les seuils de vibration indiqués dans le tableau ci-dessous, une alerte peut être générée pour signaler la situation et prendre des mesures correctives appropriées.

#### **4.3.1.2 Capteur de Température**

Les capteurs de température sont utilisés pour surveiller la température du compresseur. Des seuils de température prédéfinis sont établis pour déterminer les plages de fonctionnement acceptables. Si la température dépasse ces seuils (comme indiqué dans le tableau ci-dessous), une alerte est déclenchée pour indiquer un éventuel problème de refroidissement ou de lubrification. Cela permet d'intervenir rapidement avant que la situation ne s'aggrave et de prévenir les dommages potentiels.

Seuil / Capteur	Normale	Alarme	déclenchement
Vibration	1.6 mm/s - 2 mm/s	10 mm/s	15 mm/s
Température	40 °C - 50 °C	65 °C	70 °C

**Tableau 5.** Les seuils des capteurs du compresseur GP1/Z.

En combinant l'utilisation des capteurs de vibrations et de température avec un programme de maintenance préventive bien planifié, le complexe GP1Z peut s'assurer que le compresseur de butane fonctionne de manière optimale. Cela garantit une production continue et fiable, tout en réduisant les risques de pannes coûteuses et les temps d'arrêt imprévus. La surveillance proactive et la maintenance régulière contribuent à prolonger la durée de vie du compresseur, à optimiser son rendement énergétique et à assurer la qualité du produit final.

## 4.4 Création du compresseur de butane dans OpenBOM

### 4.4.1 Plateforme PLM OpenBom

OpenBOM est une plateforme PLM dans le cloud qui vise à faciliter la gestion des informations relatives aux produits. Elle permet de centraliser et de partager les données liées aux composants, aux assemblages, aux spécifications techniques, aux documents et à d'autres éléments essentiels pour la conception, la fabrication et la maintenance des produits, comme nous avons vu dans le chapitre 1.



**Figure 4.5.** La plateforme OpenBom [108].



OpenBOM est un outil pour gérer les nomenclatures (BOM - **Bill of Materials**), les catalogues, les fournisseurs et les bons de commande pour les équipes d'ingénierie et de fabrication. Voici quelques caractéristiques [108] :

- Suivi des enregistrements de nomenclature.
- Suivi de l'utilisation des pièces sur plusieurs nomenclatures.
- Cumuler les coûts et les quantités pour tous les niveaux.
- Gérer les catalogues des articles et la quantité disponible.
- Gérer la production, les stocks et les achats (les bons de commande).
- Gérer les révisions et les modifications.
- Partager de données pour les collaborations.
- S'intègre aux outils **MCAD** (**Mechanical Computer-Aided Design**) et **ECAD** (**Electronic Computer-Aided Design**) pour importer des nomenclatures et des modifications à partir de plusieurs systèmes de CAO.

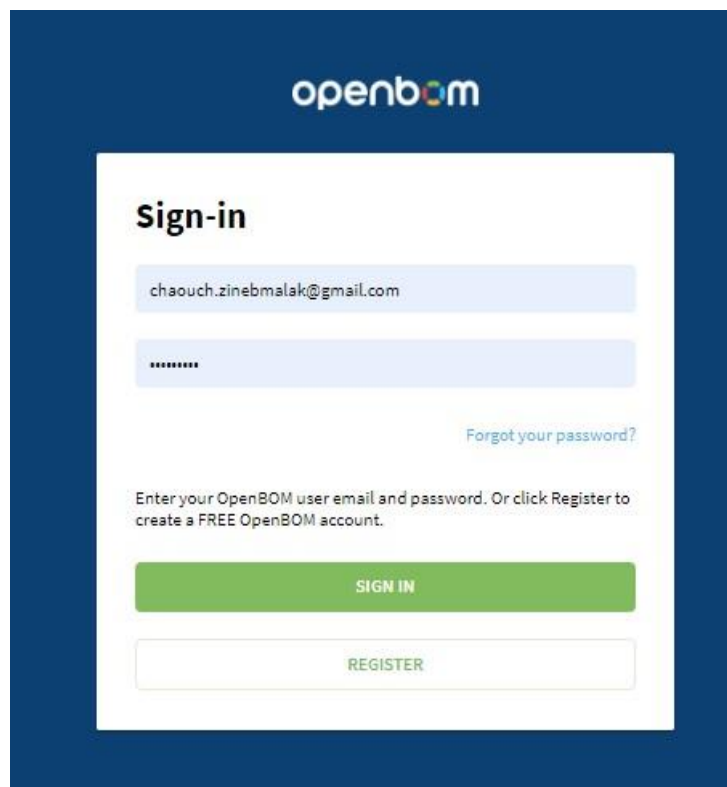
OpenBOM prend en charge une large gamme d'intégrations avec les systèmes de CAO, PDM, PLM, ERP, CRM, API REST de gestion de contenu et de stockage de fichiers dans le cloud.

#### 4.4.2 Connexion à OpenBOM

Utilisateur	Équipe	Entreprise	Entreprise
			
<b>Gratuit</b> n / A	<b>3 500 \$ /équipe</b> facturé annuellement	<b>8 500 \$ /entreprise</b> facturé annuellement	<b>Appel</b> facturé annuellement
<a href="#">S'inscrire maintenant</a>	<a href="#">Acheter maintenant</a>	<a href="#">Acheter maintenant</a>	<a href="#">Contactez-nous</a>
Pour qu'un seul utilisateur puisse gérer les informations sur les produits, créer et gérer facilement des nomenclatures, importer Excel.	Pour une équipe ou une entreprise cherchant à créer une source unique de vérité en gérant les informations sur les produits, les fichiers CAO, les articles, les nomenclatures, les révisions, l'inventaire, les appels d'offres/bons de commande, l'accès aux données	Pour une entreprise qui exige une gouvernance et un contrôle des données, une gestion complète du cycle de vie des produits, y compris des processus de gestion de la configuration et de gestion des modifications (ECO/ECR).	Pour les organisations ayant des exigences complexes en matière de gestion des données, développez une intégration personnalisée avec les systèmes PDM, PLM, ERP et les exigences spéciales de l'entreprise.

**Figure 4.6.** Formule d'abonnement annuel OpenBOM [108].

OpenBOM offre une inscription instantanée et des fonctionnalités gratuites mentionnées dans le tableau ci-dessus, ce qu'aucun autre PLM n'offre ces fonctionnalités à tout le monde. C'est pourquoi nous avons choisi cette plateforme.



**Figure 4.7.** Connexion à OpenBom.

## **4.4.3 Création de la nomenclature du compresseur**

### **4.4.3.1 Nomenclature (BOM -Bill of Materials)**

Une nomenclature ou structure de produit est une liste des assemblages, des articles (items) et des quantités nécessaires de chacun pour obtenir un produit fini. Les articles peuvent être réutilisés dans les nomenclatures et permettent d'ajouter des informations supplémentaires à l'article dans les nomenclatures, telles que la quantité ou la désignation de référence [108].

Nous avons créé une nomenclature pour le compresseur de butane (figure 4.8), en spécifiant ses propriétés, notamment celles relatives aux vibrations et à la température, afin de faciliter l'intégration des données.

### **4.4.3.2 Propriétés de la nomenclature**

La propriété est un élément de base des mécanismes de modélisation de données d'OpenBOM. Dans OpenBOM la création d'une propriété représente une information unique (par exemple description, nom du fabricant, coût, fournisseur, etc.). Une fois qu'une propriété est définie, elle peut être utilisée à d'autres endroits dans OpenBOM (catalogues, nomenclatures, bons de commande, etc.) [108].

Bien qu'OpenBOM ressemble à une feuille de calcul (Excel), il fonctionne très différemment. L'une des principales différences est la façon dont nous définissons les données. Dans chaque feuille de calcul, les données sont définies sous forme de colonnes (A, B, C, ...). Dans OpenBOM, nous utilisons le terme "propriété" pour les nomenclatures ou catalogues de pièces. Elle peut être définie comme l'un de plusieurs types spécifiques : Texte, Nombre, Liste, Liste multi-sélection, Référence, Case à cocher, Image, Devise et Date. L'utilisation de propriétés permet de définir et de gérer les données de manière plus spécifique [108].

- **Type de propriétés (publiques ou privées) :**









- Les propriétés publiques sont disponibles pour tous les utilisateurs d'OpenBOM. Nous pouvons les créer et les réutiliser, mais nous ne pouvons pas supprimer ou modifier.
- Les propriétés privées peuvent être créées à l'aide de tables de propriétés privées et ces noms ne sont visibles que par un utilisateur ou une équipe spécifique.

- **Propriétés OpenBOM prédéfinies et réservées :**

OpenBOM utilise certaines propriétés par défaut. Ils sont à la base des fonctions OpenBOM

- Numéro de pièce : identifiant unique de tous les enregistrements dans les nomenclatures et les catalogues.
- Quantité disponible : utilisée pour le contrôle des stocks (pas le cas dans notre structure).
- Thumbnail Image : propriété d'image par défaut.

Pour notre travail, nous avons créé une nomenclature (BOM - Bill of Materials) pour le compresseur de butane comme illustré dans la figure, en spécifiant ses propriétés, notamment celles relatives aux vibrations et à la température, afin de faciliter l'intégration des données.

	Part Number	Type	[Thumbnail image]	Quantity	[Description]	Vibration (min)	Vibration (min-1)	Vibr (min)
1	C-0000	Assemblage		1	Compresseur alternatif à pistons à double effet C4 "butane"			
1.1	C-0001	Assemblage		2	Cylindre horizontal à double effet.			
1.1.1	C-0002	Pièce		1	piston			
1.1.2	C-0003	Assemblage		4	Les clapets (Soupapes) d'aspirations et refoulements			
1.2	C-0004	Pièce		1	Vilebrequin			
1.3	C-0005	Assemblage		1	moteur électrique			
1.3.1	C-0035	Assemblage		2	Capteur de Vibration			
1.3.2	C-0025	Assemblage		2	Capteur de Température			

**Figure 4.8.** Structure du compresseur dans OpenBOM.

## 4.5 Collecte de données à partir des capteurs du compresseur GP1Z

Nous avons importé les données de nos capteurs IIoT, qui mesurent les vibrations et les températures au format Excel depuis le service **DCS (Distributed Control System)** du complexe GP1Z, après avoir vérifié la compatibilité de ce format avec la plateforme OpenBOM.

	A	B	C	D	E	F
1	Date et heure	Vibration (mm/s)	Température Moteur (°C)	Température Vilebrequin (°C)	Température Cylindre 1 (°C)	Température Cylindre 2 (°C)
2	05/05/2023 09:35	-0,13	26,67	28,92	28,66	26,61
3	05/05/2023 09:36	-0,13	26,68	28,92	28,64	26,59
4	05/05/2023 09:37	-0,13	26,66	28,91	28,59	26,58
5	05/05/2023 09:38	-0,13	26,67	28,91	28,57	26,55
6	05/05/2023 09:39	-0,14	26,62	28,91	28,57	26,57
7	05/05/2023 09:40	-0,14	26,66	28,92	28,55	26,54
8	05/05/2023 09:42	-0,13	26,62	28,86	28,53	26,52
9	05/05/2023 09:43	-0,13	26,65	28,85	28,54	26,54
10	05/05/2023 09:44	-0,13	26,64	28,86	28,55	26,54
11	05/05/2023 09:45	-0,13	26,65	28,83	28,56	26,54
12	05/05/2023 09:46	-0,13	26,66	28,84	28,56	26,52
13	05/05/2023 09:47	-0,13	26,66	28,81	28,56	26,54
14	05/05/2023 09:48	-0,13	26,65	28,83	28,54	26,54
15	05/05/2023 09:49	-0,12	26,65	28,82	28,52	26,54
16	05/05/2023 09:50	-0,13	26,64	28,82	28,52	26,53
17	05/05/2023 09:51	-0,13	26,62	28,82	28,51	26,53
18	05/05/2023 09:52	-0,13	26,6	28,8	28,52	26,49
19	05/05/2023 09:53	-0,1	26,58	28,81	28,51	26,47
20	05/05/2023 09:54	-0,13	26,59	28,81	28,47	26,47
21	05/05/2023 09:55	-0,13	26,57	28,82	28,46	26,45
22	05/05/2023 09:56	-0,13	26,58	28,8	28,47	26,45
23	05/05/2023 09:57	-0,13	26,55	28,81	28,46	26,43

**Figure 4.9.** Données IIoT du compresseur de butane GP1Z.

## 4.6 Procédure d'intégration des données IIoT dans OpenBom

### 4.6.1 Préparation des données

Étant donné que le compresseur que nous avons sélectionné dispose de plusieurs capteurs à différents emplacements, nous avons choisi d'intégrer uniquement les mesures de température et de vibrations liées au moteur. Nous avons préparé notre fichier Excel comme indiqué dans la Figure 4.10.

	A	B	C
1	Date et heure	Vibration (mm/s)	Température Moteur (°C)
2	05/05/2023 20:01	0,48	24,64
3	05/05/2023 20:02	1,15	24,66
4	05/05/2023 20:03	1,36	24,67
5	05/05/2023 20:04	1,46	24,63
6	05/05/2023 20:05	1,33	24,7
7	05/05/2023 20:06	1,34	24,69
8	05/05/2023 20:07	1,28	24,68
9	05/05/2023 20:08	1,22	24,66
10	05/05/2023 20:09	1,21	24,64
11	05/05/2023 20:10	1,27	24,64
12	05/05/2023 20:11	1,28	24,61
13	05/05/2023 20:12	1,26	24,61
14	05/05/2023 20:13	1,29	24,6
15	05/05/2023 20:14	1,28	24,6
16	05/05/2023 20:15	1,28	24,6
17	05/05/2023 20:16	1,27	24,64
18	05/05/2023 20:17	1,27	24,6
19	05/05/2023 20:18	1,26	24,64
20	05/05/2023 20:19	1,27	24,88
21	05/05/2023 20:20	1,29	25,38
22	05/05/2023 20:21	1,28	26,15
23	05/05/2023 20:22	1,27	27,01

**Figure 4.10.** Les mesures de température et de vibrations liées au moteur.

### 4.6.2 Importation des données dans OpenBOM

Comme nous utilisons la version éducation d'OpenBOM, nous avons rencontré plusieurs limitations dans l'utilisation de la plateforme. Par conséquent, nous avons choisi comme solution de développer un petit programme d'automatisation pour importer nos données Excel.

- **Langage de programmation utilisé :** nous avons utilisé le langage de programmation Python et l'environnement Jupyter Notebook (pour tester chaque morceau de code séparément).

- **La bibliothèque Selenium** : est une bibliothèque pour l'automatisation des navigateurs web. Elle permet de contrôler un navigateur web, de localiser des éléments sur une page, d'interagir avec ces éléments et de réaliser diverses actions automatisées avec différents navigateurs web tel que Google Chrome grâce au chrome driver.
- **Le programme** :

```

from selenium import webdriver
from selenium.webdriver.common.by import By
from selenium.webdriver.chrome.service import service
import pandas as pd
import time
from selenium.webdriver.support.wait import WebDriverWait
from selenium.webdriver.support import expected_conditions as EC

PATH = "C:\Program Files (x86)\chromedriver.exe"
driver = webdriver.Chrome(PATH)
driver.get("https://www.openbom.com/")

C:\Users\U2TEK\AppData\Local\Temp\ipykernel_8916\179037120.py:2: DeprecationWarning: executable_path has been deprecated, please pass in a Service object
  driver = webdriver.Chrome(PATH)

#mis à jour température et vibration d'après fichier excel

df = pd.read_excel(r'V1-T1.xlsx')

recherche1 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[43]/textarea')
recherche2 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[44]/textarea')
recherche3 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[45]/textarea')
recherche4 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[46]/textarea')
recherche5 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[47]/textarea')
recherche6 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[48]/textarea') #moy temp

recherche11 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[22]/textarea')
recherche12 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[23]/textarea')
recherche13 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[24]/textarea')
recherche14 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[25]/textarea')
recherche15 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[26]/textarea')
recherche19 = driver.find_element(By.XPATH, '//*[@id="table"]/div[27]/textarea') #moy vib

valeurs_chargées1 = []
valeurs_chargées2 = []

recherche1_value1 = df["TIAH_2865B.DACA.PV_Value"][0]
recherche11_value2 = df["VIAH_2852B.DACA.PV_Value"][0]

recherche1.send_keys(recherche1_value1)

```

```

recherche11.send_keys(recherche11_value2)

valeurs_chargées1.append(recherche1_value1)
valeurs_chargées2.append(recherche11_value2)

time.sleep(7)

for i in range(1, len(df)):
    recherche1_value1 = df["TIAH_2865B.DACA.PV_Value"][i]
    recherche11_value2 = df["VIAH_2852B.DACA.PV_Value"][i]

    recherche1.clear()
    recherche1.send_keys(recherche1_value1)
    recherche11.clear()
    recherche11.send_keys(recherche11_value2)

    valeurs_chargées1.append(recherche1_value1)
    valeurs_chargées2.append(recherche11_value2)

    if i >= 1:
        recherche2_value1 = df["TIAH_2865B.DACA.PV_Value"][i-1]
        recherche12_value2 = df["VIAH_2852B.DACA.PV_Value"][i-1]

        recherche2.clear()
        recherche2.send_keys(recherche2_value1)
        recherche12.clear()
        recherche12.send_keys(recherche12_value2)

        if i >= 2:
            recherche3_value1 = df["TIAH_2865B.DACA.PV_Value"][i-2]
            recherche13_value2 = df["VIAH_2852B.DACA.PV_Value"][i-2]

            recherche3.clear()
            recherche3.send_keys(recherche3_value1)
            recherche13.clear()
            recherche13.send_keys(recherche13_value2)

            if i >= 3:
                recherche4_value1 = df["TIAH_2865B.DACA.PV_Value"][i-3]
                recherche14_value2 = df["VIAH_2852B.DACA.PV_Value"][i-3]

                recherche4.clear()
                recherche4.send_keys(recherche4_value1)
                recherche14.clear()
                recherche14.send_keys(recherche14_value2)

                if i >= 4:
                    recherche5_value1 = df["TIAH_2865B.DACA.PV_Value"][i-4]
                    recherche15_value2 = df["VIAH_2852B.DACA.PV_Value"][i-4]

                    recherche5.clear()
                    recherche5.send_keys(recherche5_value1)
                    recherche15.clear()
                    recherche15.send_keys(recherche15_value2)

                    moyenne_valeurs_chargées1 = round(sum(valeurs_chargées1) / len(valeurs_chargées1), 3)
                    moyenne_valeurs_chargées2 = round(sum(valeurs_chargées2) / len(valeurs_chargées2), 3)

                    recherche6.clear()
                    recherche6.send_keys(moyenne_valeurs_chargées1)
                    recherche19.clear()
                    recherche19.send_keys(moyenne_valeurs_chargées2)

                    time.sleep(7)

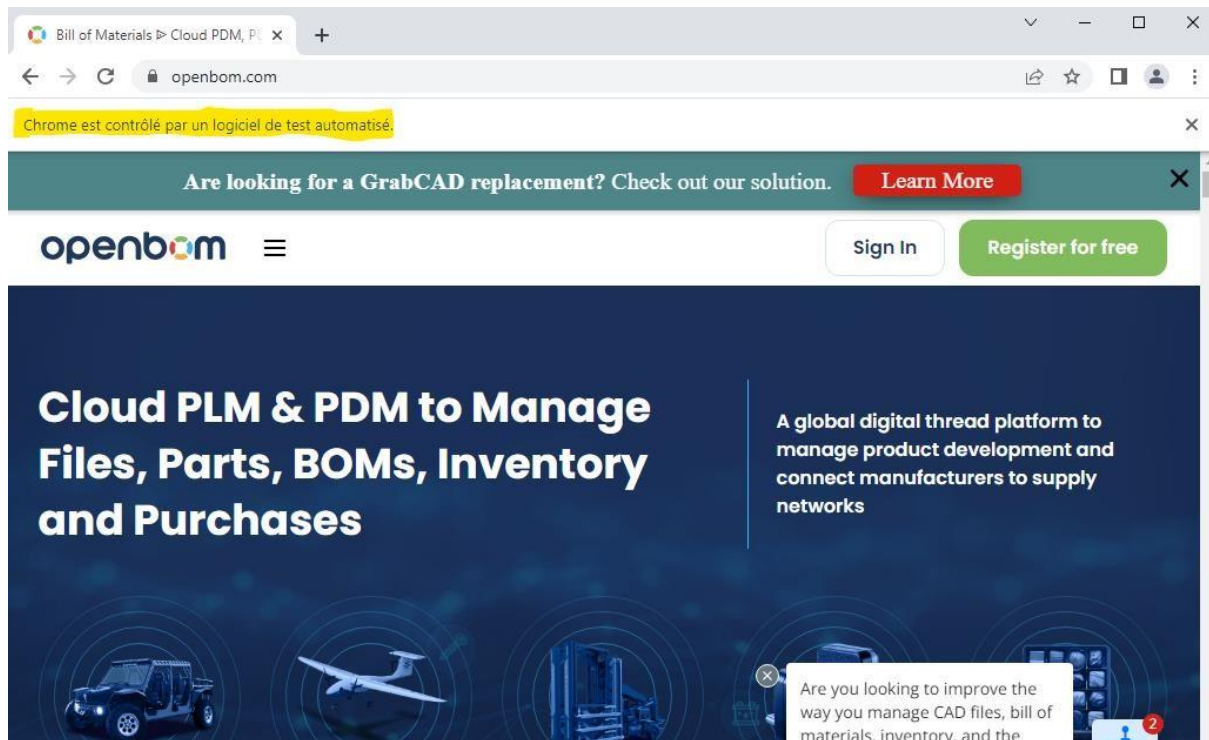
```

**Figure 4.11.** Code d'intégration des données IIoT dans OpenBOM.



Ce code permet de mettre à jour les mesures de température et de vibration à partir de notre fichier Excel, sur une période spécifique. Il permet de décaler les valeurs afin que l'utilisateur d'OpenBOM puisse visualiser les 5 dernières valeurs (température et vibration). De plus, il calcule la moyenne totale de ces mesures depuis le début jusqu'à la fin du fonctionnement du compresseur.

- **Les résultats de programme :**



**Figure 4.12.** Plateforme OpenBom automatisée.

	[Description]	Vibration (min)	Vibration (min-1)	Vibration (min-2)	Vibration (min-3)	Vibration (min-4)	Vibration Moyenne	Température (min)	Température (min-1)	Tempér... (min-2)	Tempé... (min-3)	Tem... (min-4)	Temp... Moyenne
1.3.1	Capteur de Vibration	1.33	1.46	1.36	1.15	0.48	1.156						
1.3.2	Capteur de Température							24.7	24.63	24.67	24.66	24.64	24.66

**Figure 4.13.** Des données IIoT dans OpenBom PLM.

## 4.7 Utilisation ces données pour la maintenance préventive

La figure ci-dessous illustre les différents niveaux de communication présents dans le complexe GP1/Z, avec deux niveaux importants pour notre étude : le niveau capteurs et le niveau entreprise ou supervision.

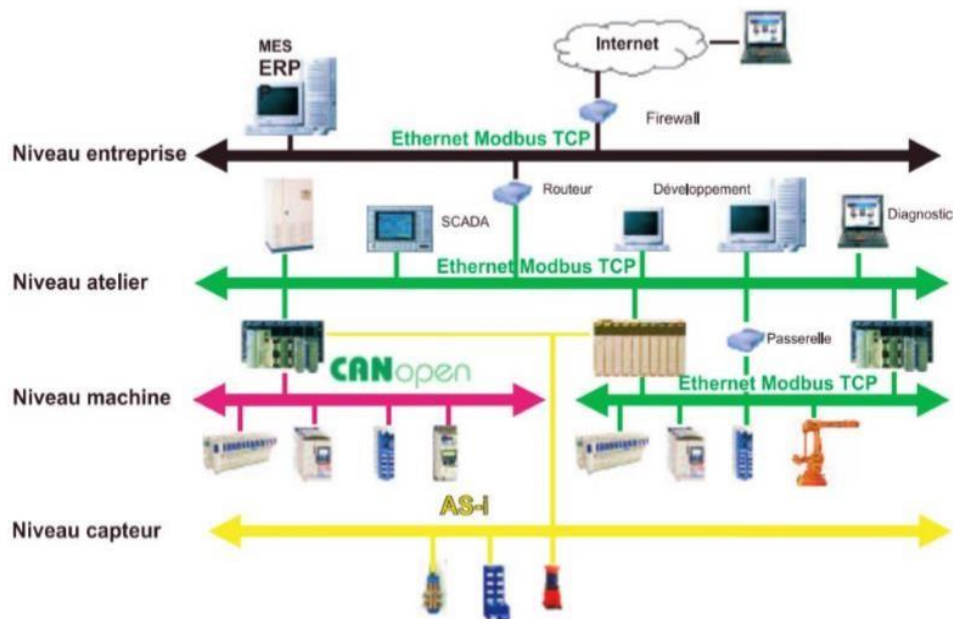


Figure 4.14. Les niveaux de communication GP1/Z.

- **Niveau capteur :** il s'agit de l'installation de capteurs IIoT pour mesurer les vibrations et les températures du compresseur.
- **Niveau supervision (entreprise)**

Inclut l'intégration de notre système PLM. Il permet de collecter, d'analyser et de gérer les données provenant des capteurs du compresseur pour une surveillance efficace de son état et la détection d'anomalies, selon notre proposition de planification de la maintenance préventive :

La structure du compresseur dans OpenBOM PLM comprend les cinq dernières valeurs de température et de vibration, ainsi que la moyenne totale de ces mesures depuis le début jusqu'à la fin du fonctionnement du compresseur. Ces informations nous permettent d'avoir une vue de l'état du compresseur en comparant les mesures affichées avec les seuils prédéfinis au fil du temps, ce qui nous permet de prendre des décisions basées sur ces données, ou d'intégrer un autre système plus fiable tel que le système d'alerte.

Un système d'alerte pour détecter les dysfonctionnements des équipements, les variations anormales des paramètres de fonctionnement, ...etc. Cela permet aux équipes de maintenance d'intervenir rapidement pour résoudre le problème et d'éviter les interruptions de production ou les incidents plus graves. Lorsque les valeurs mesurées dépassent les seuils normaux, comme indiqué dans le tableau précédent, le système d'alerte se déclenche sous la forme d'une alarme sonore et d'une notification sur le système PLM.

## **4.8 Utilisation de l'IoT pour la démonstration**

Nous avons expliqué précédemment comment nous avons obtenu des données IIoT à partir des capteurs placés sur le compresseur de gaz butane du complexe GP1Z, et comment nous les avons intégrés dans la plateforme PLM OpenBOM. Nous allons maintenant faire une démonstration pratique de l'IoT en utilisant notre propre capteur.

Dans cette démonstration, nous utilisons une carte Arduino avec un capteur DHT11 qui mesure la température et l'humidité de l'environnement. Les données recueillies par les capteurs ont été enregistrées au format Excel à l'aide du logiciel PLX-DAQ. Cette démonstration montre comment ces composants peuvent être intégrés pour créer un système IoT efficace qui permet la collecte et l'analyse de données environnementales en temps réel.

### **4.8.1 Matériel et logiciels utilisés**

#### **4.8.1.1 La carte Arduino**

Arduino est un outil pour construire des appareils qui interagissent avec leur environnement. Il peut être utilisé pour connecter des capteurs qui détectent le son, la température, la lumière ou les vibrations, puis les utiliser pour allumer les lumières, mesurer la température, changer les couleurs, démarrer les moteurs et bien d'autres choses. L'Arduino est un système incroyable, qui se situe au cœur de toutes ces actions. Il recueille des informations provenant de capteurs pour évaluer le monde réel qui l'entoure. Il prend ensuite des décisions en fonction des données qu'il collecte, ce qui déclenche à son tour une action sous forme de son, de lumière ou même de mouvement [112].

Arduino se présente généralement sous la forme d'une petite carte électronique programmable et d'un logiciel "open source" accessible à tous pour créer facilement des systèmes électroniques. Il existe plusieurs types de cartes Arduino, parmi les cartes les plus utilisées surtout dans les systèmes embarqués : Leonardo, NANO, UNO, MEGA, DUE, et Yun...etc. Dans cette partie de notre travail, parmi ces types nous avons choisi la carte Arduino UNO. [113]

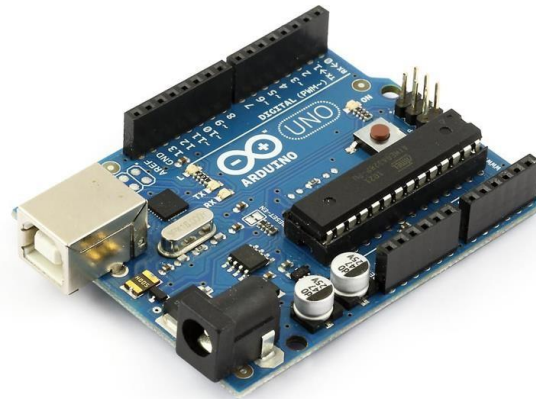


Figure 4.15. Carte Arduino UNO [112].

#### 4.8.1.1 Présentation de la Carte Arduino UNO

L'Arduino UNO est une carte électronique programmable basée sur un microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328, qui permettent de contrôler des éléments mécaniques : systèmes, lumières, moteurs, etc. Cette carte est constituée de 14 broches d'entrées/sorties digitales (dont six sont utilisables en tant que sortie PWM (Pulse With Modulation)), de 6 broches d'entrées analogiques, d'une connexion USB, d'une connexion d'alimentation, et possède un bouton de remise à zéro (RESET). La figure ci-dessous représente les composants de cette carte [113].

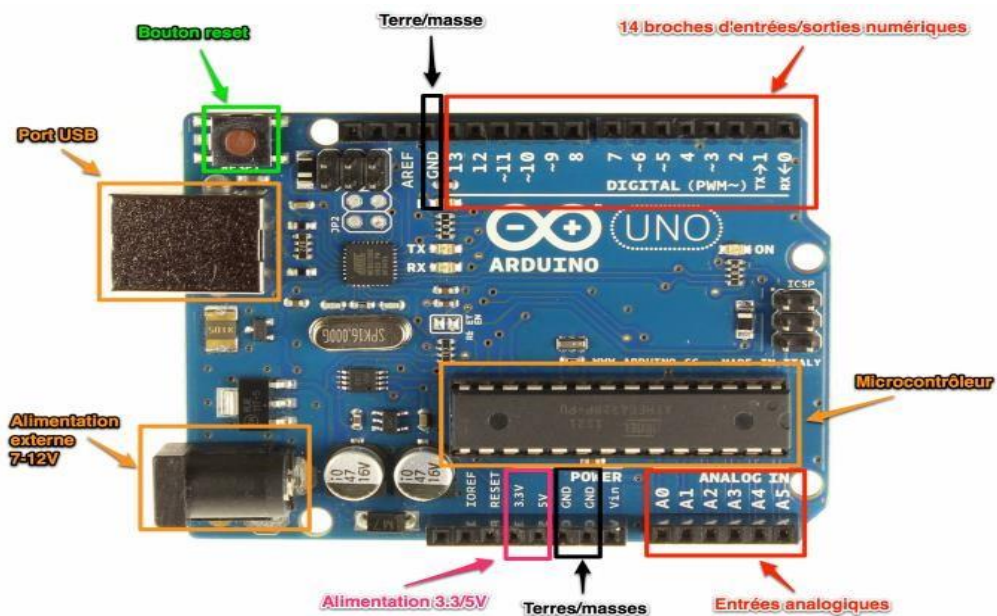


Figure 4.16. Les composants de la carte Arduino UNO [113].

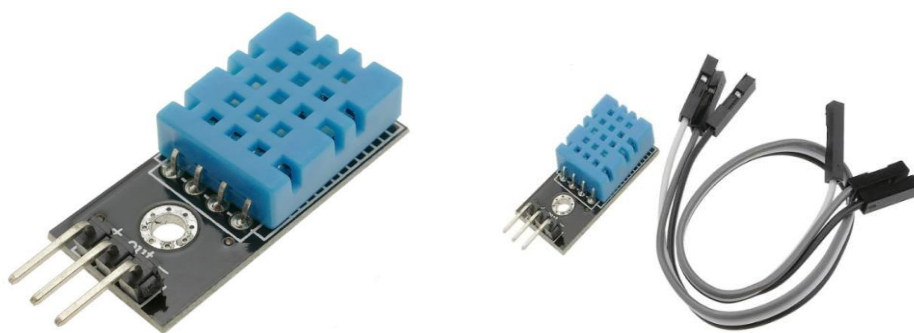
### 4.8.1.1.2 Pourquoi Arduino UNO

- Arduino UNO est le produit populaire parmi les cartes Arduino.
- Parfaite pour débiter la programmation Arduino, elle est constituée de tous les éléments de base pour construire des objets d'une complexité relativement faible.
- Le prix réduits (pas cher).
- Environnement de programmation clair et simple.
- Compatible avec toutes les plateformes (Windows, Mac OS, Linux).
- Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- Logiciel et matériel open source et extensible.
- Une communauté ultra développée ! Des milliers de forums d'entre-aide, de présentations de projets, de propositions de programmes, de tutoriaux et exemples en ligne ... etc.

### 4.8.1.2 Capteur DHT11

Le capteur DHT11 fournit une sortie numérique proportionnelle à la température et à l'humidité mesurée par le capteur. La technologie utilisée pour produire le capteur DHT11 garantit une grande fiabilité, une excellente stabilité à long terme et un temps de réponse très rapide. L'interface physique du capteur est constituée d'un connecteur à 3 broches : +5V, GND et DATA (Figure 4.17). Les deux premières broches sont l'alimentation et la masse, qui sont utilisées pour alimenter le capteur, et la troisième représente le signal de sortie numérique du capteur [111].

Le capteur DHT11 est capable de mesurer la température de 0 à +50°C avec une précision de +/- 2°C et des niveaux d'humidité relative de 20% à 80% avec une précision de +/- 5%. Une mesure peut être effectuée toutes les secondes [111].

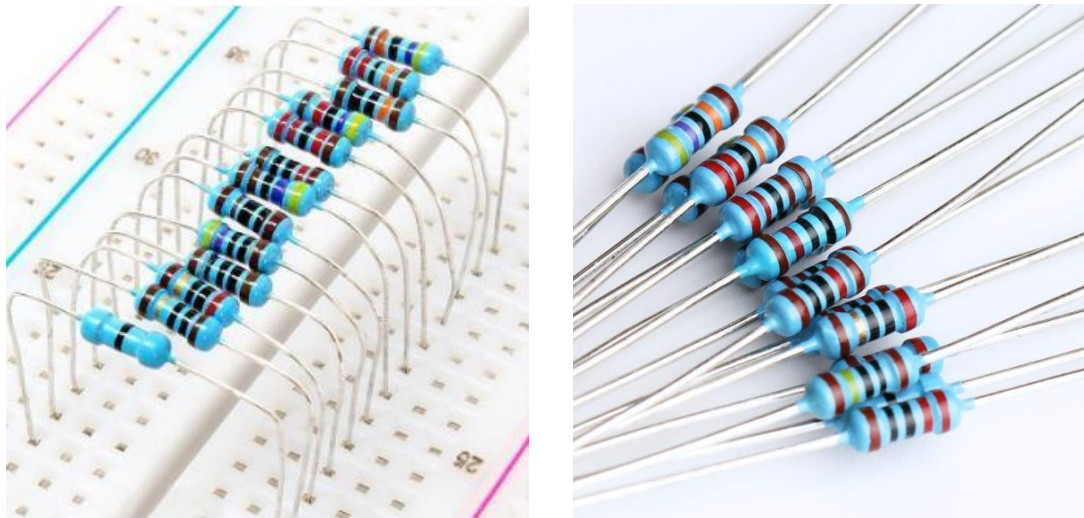


**Figure 4.17.** Capteur DHT11 [111].

### 4.8.1.3 Résistance Arduino

Les résistances Arduino sont un composant électronique essentiel utilisé dans de nombreux projets basés sur la plate-forme Arduino (Figure 4.18). C'est un composant passif qui résiste au passage du courant électrique et se mesure en ohms ( $\Omega$ ).

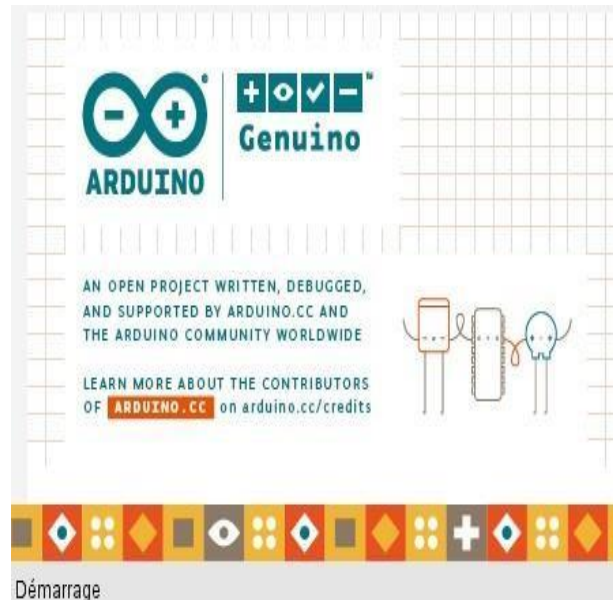
Les résistances jouent un rôle très important dans la prévention des surtensions ou des surintensités. Certains capteurs peuvent être sensibles aux changements de tension ou aux surtensions. En intégrant des résistances appropriées dans le circuit, le courant ou la tension appliquée au capteur peuvent être limités, ce qui aide à protéger le capteur et à prévenir les dommages qui pourraient affecter le capteur ou l'Arduino lui-même [112].



**Figure 4.18.** Les Résistances Arduino [112].

### 4.8.1.4 Arduino IDE

L'Arduino **IDE** (**I**ntegrated **D**evelopment **E**nvironnement) est le logiciel qui permet de programmer la carte Arduino (Figure 4.19), est un environnement de développement open source et gratuit, téléchargeable sur le site officiel Arduino. Le langage utilisé par ce logiciel est basé sur le C/C++. Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers la liaison USB. Ce dernier alimente à la fois la carte et transporte aussi l'information. Le logiciel est accompagné d'une bibliothèque riche qui offre un large éventail de fonctionnalités et de modules préprogrammés [109].



**Figure 4.19.** Logiciel Arduino IDE.

#### **4.8.1.5 PLX-DAQ (Parallax Data Acquisition)**

PLX-DAQ est un outil complémentaire d'acquisition de données de microcontrôleur Parallax pour Microsoft Excel (Figure 4.20). N'importe lequel microcontrôleur connecté à n'importe quel capteur et au port série d'un PC peut désormais envoyer des données directement dans Excel.

Le logiciel PLX-DAQ communique avec Arduino en utilisant l'interface de communication série. Il envoie des commandes à Arduino pour demander des données et reçoit ces données en temps réel. Les données reçues sont ensuite enregistrées ou affichées dans un tableau, permettant une visualisation facile, une analyse et un stockage des données acquises. PLXDAQ possède les fonctionnalités suivantes [110] :

- Lire/écrire n'importe quelle cellule d'une feuille de calcul.
- Marquez les données en temps réel (hh:mm:ss) ou en secondes depuis la réinitialisation.
- Enregistrez jusqu'à 26 colonnes de données.
- Tracer ou représenter graphiquement les données à mesure qu'elles arrivent en temps réel à l'aide de Microsoft Excel.



**Figure 4.20.** Le logiciel PLX-DAQ.

Dans notre travail, nous avons utilisé PLX-DAQ pour acquérir des données depuis Arduino et les enregistrer dans un fichier Excel, car nous avons besoin de ces données au format Excel pour les utiliser dans la prochaine étape.

#### **4.8.2 Notre propre démonstrateur sur la plateforme ARDUINO**

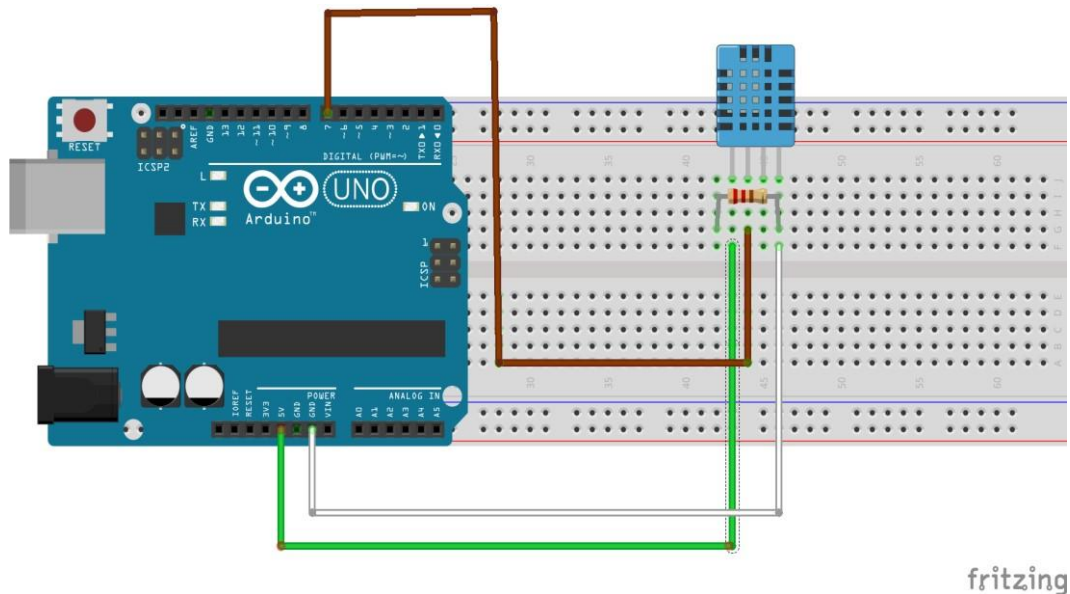
Dans le cadre de la maintenance préventive, nous nous appuyons toujours sur les données collectées pour concevoir ou améliorer un système. L'enregistrement des données et leur analyse est une pratique courante dans la plupart des industries, ici nous construisons le projet Arduino Data Logger (Enregistreur de données Arduino) où nous apprendrons comment nous pouvons enregistrer des données à un intervalle de temps spécifique. Nous allons utiliser une carte Arduino pour lire certaines données (ici la température, l'humidité, la date et l'heure) et les sauvegarder simultanément sur l'ordinateur.

Les données enregistrées peuvent être facilement ouvertes dans une feuille Excel pour des analyses ultérieures. Pour obtenir la température et l'humidité nous utiliserons le capteur DHT11.



### 4.8.2.1 Branchement d'un capteur DHT11 avec la carte Arduino

Le schéma de circuit de ce projet d'enregistreur de température et d'humidité Arduino est illustré ci-dessous :

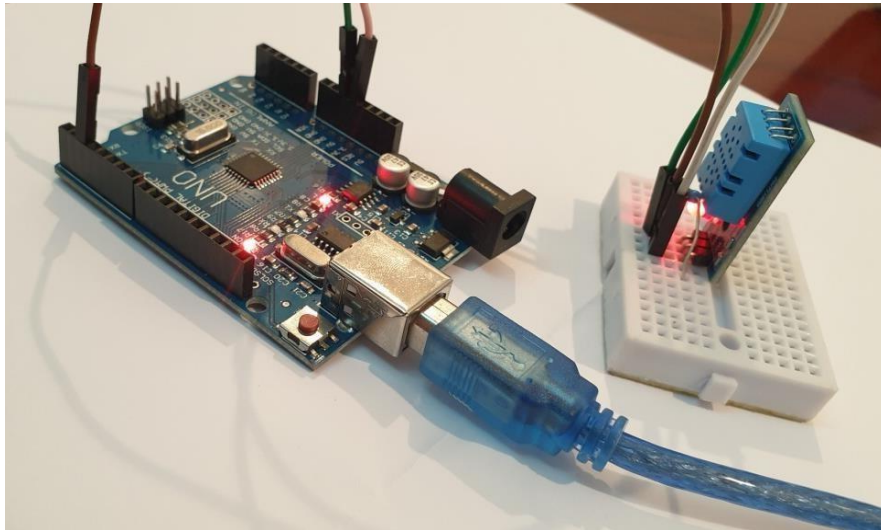


**Figure 4.21.** Connexion de capteur DHT11 avec la carte Arduino UNO.

Comme le montre le schéma de circuit, les connexions sont classées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 6.** Branchement du capteur DHT11 avec Arduino.

Capteur de température et d'humidité dht11	
Arduino Pin	Module Pin
VCC	5V
GND	GND
DATA	Pin 2



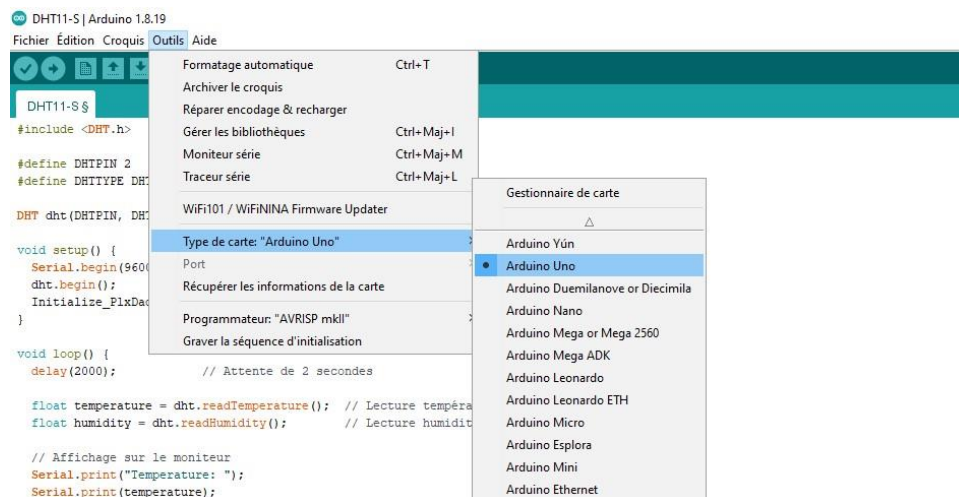
**Figure 4.22.** Notre branchement du capteur DHT11 avec Arduino.

### 4.8.2.2 Explication du programme Arduino

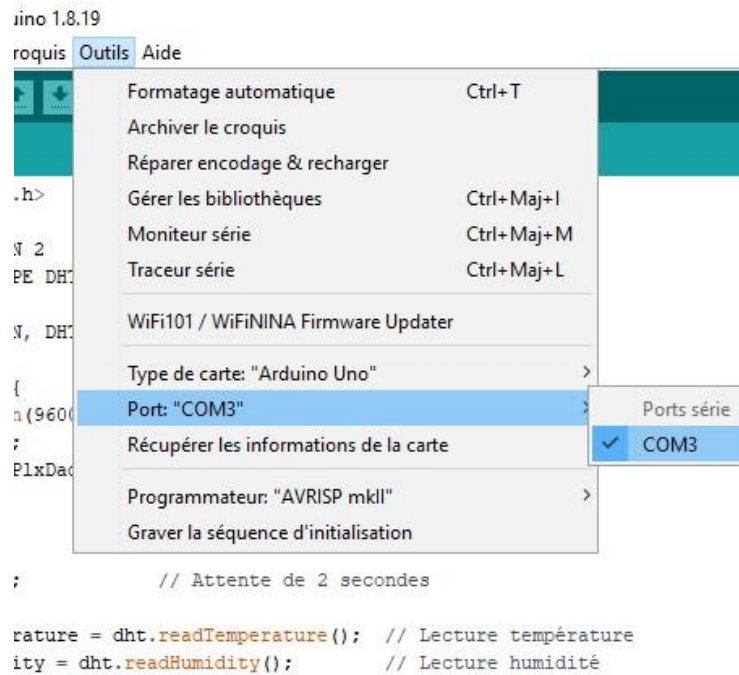
Nous devons écrire le programme Arduino qui peut faire ce qui suit :

- ✓ Lire les données du capteur DHT11
- ✓ Enregistrer la date, l'heure, la température et l'humidité sur une feuille Excel exécutée sur un ordinateur.

Avant d'envoyer un programme dans la carte, il est nécessaire de sélectionner le type de la carte (dans notre cas Arduino UNO) comme représenté à la figure 4.23 et le numéro de port USB (dans notre cas COM 3) comme représenté à la figure 4.24.

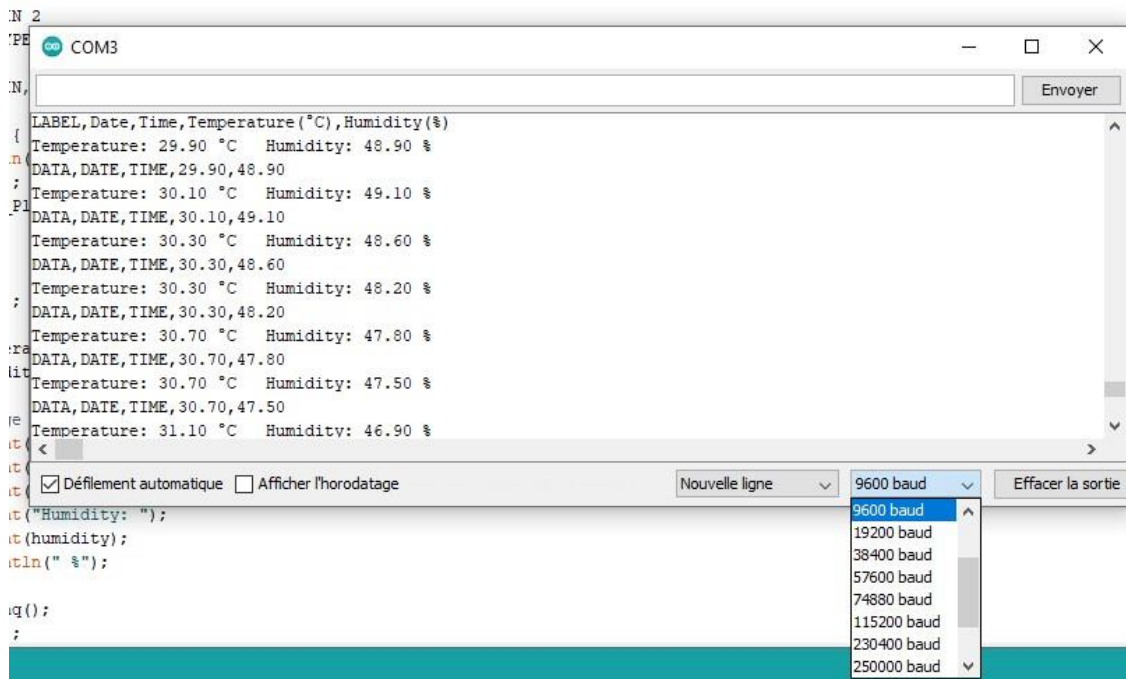


**Figure 4.23.** Paramétrage de la carte -Type de carte.



**Figure 4.24.** Paramétrage de la carte -Numéro de port USB.

Maintenant il faut initialiser le port série à une vitesse de 9600 bauds pour l'affichage des valeurs mesurées comme représenté à la figure ci-dessous :



**Figure 4.25.** Paramétrage de la carte -Numéro de baud.

## Programme de lecture et d'écriture des données de température et d'humidité

```
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 2          // Broche de connexion
#define DHTTYPE DHT11    // Type de capteur

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);     // Initialisation de la communication série
  dht.begin();
  Initialize_PlxDaq();
}

void loop() {
  delay(2000);           // Attente de 2 secondes entre chaque lecture

  float temperature = dht.readTemperature(); // Lecture de la température
  float humidity = dht.readHumidity();       // Lecture de l'humidité

  // Affichage des valeurs sur le moniteur série
  Serial.print("Temperature: ");
  Serial.print(temperature);
  Serial.print(" °C\n");
  Serial.print("Humidity: ");
  Serial.print(humidity);
  Serial.println(" %");

  Write_PlxDaq();
  delay(5000);
}

void Write_PlxDaq()
{
  Serial.print("DATA");
  Serial.print(",");
  Serial.print("DATE");
  Serial.print(",");
  Serial.print("TIME");
  Serial.print(",");
  Serial.print(dht.readTemperature());
  Serial.print(",");
  Serial.print(dht.readHumidity());
  Serial.println();
}

void Initialize_PlxDaq()
{
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Date,Time,Temperature(°C),Humidity(%)");
}
```

**Figure 4.26.** Programme de lecture et d'écriture des données du capteur DHT11.

Ce programme lit les données de température et d'humidité à partir d'un capteur DHT11 (Figure 36). Il affiche ces données sur le moniteur série et les envoie également à PLX-DAQ pour les enregistrer et les analyser ultérieurement.

### 4.8.2.3 Collecte des données avec PLX-DAQ

Le fonctionnement de l'enregistreur de données Arduino est simple. Une fois que le matériel et le logiciel sont prêts, il est temps de graver le programme sur notre carte Arduino. Dès que notre programme sera téléchargé, On va sélectionner maintenant le débit en bauds comme "9600" comme représenté à la figure 4.27 et le port com 3 auquel notre Arduino est connecté (qui ont été choisi précédemment) et on clique sur Connecter comme représenter à la figure 4.28. Les valeurs devraient commencer à être enregistrées comme indiqué dans la figure 4.29.

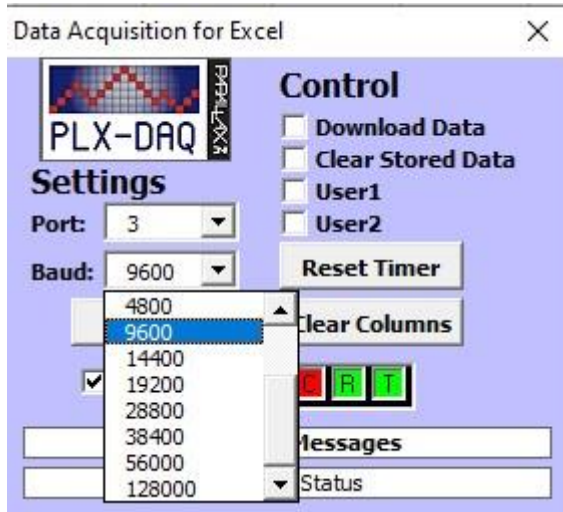


Figure 4.27. Paramétrage de PLX-DAQ (Débit en bauds).

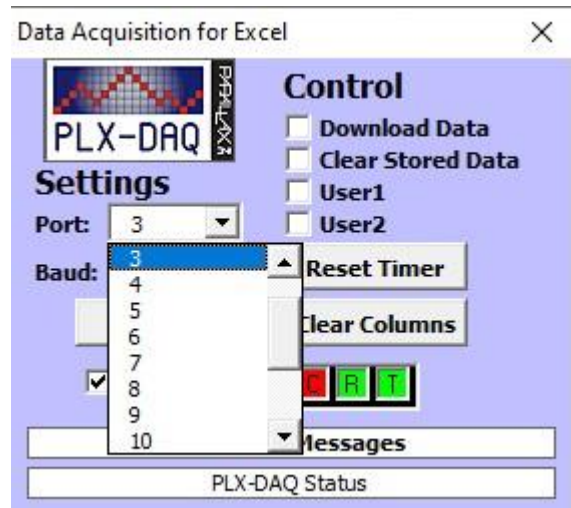


Figure 4.28. Paramétrage de PLX-DAQ (Numéro de port USB).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	Time	Temperature °C	Humidity %					
2	24/05/2023	12:11:52	25,7	48,4					
3	24/05/2023	12:11:59	25,8	48,6					
4	24/05/2023	12:12:06	25,7	48,5					
5	24/05/2023	12:12:13	25,8	48,5					
6	24/05/2023	12:12:20	25,7	48,4					
7	24/05/2023	12:12:27	25,8	48,3					
8	24/05/2023	12:12:34	26	48,2					
9	24/05/2023	12:12:41	26,1	48,1					
10	24/05/2023	12:12:48	26,1	48,2					
11	24/05/2023	12:12:55	26,1	48					
12	24/05/2023	12:13:02	26	48					
13	24/05/2023	12:13:09	26	47,9					
14	24/05/2023	12:13:16	26,1	47,7					
15	24/05/2023	12:13:23	26,2	47,7					
16	24/05/2023	12:13:30	26,3	47,5					
17	24/05/2023	12:13:37	26,3	47,5					
18	24/05/2023	12:13:44	26,4	47,4					
19	24/05/2023	12:13:51	26,4	47,2					
20	24/05/2023	12:13:59	26,5	47					
21	24/05/2023	12:14:06	26,5	46,9					
22	24/05/2023	12:14:13	26,6	46,8					
23	24/05/2023	12:14:20	26,6	46,7					
24	24/05/2023	12:14:27	26,8	46,4					
25	24/05/2023	12:14:34	26,8	46,3					
26	24/05/2023	12:14:41	26,8	46,2					
27	24/05/2023	12:14:48	26,9	46					
28	24/05/2023	12:14:55	26,9	45,9					
29	24/05/2023	12:15:02	26,8	45,9					

Figure 4.29. Enregistrement des données à l'aide du PLX-DAQ Excel.

### **4.8.3 Maintenance préventive à partir des données collectées du capteur dht11**

La collecte et l'utilisation des données de température et d'humidité des capteurs sont essentielles pour détecter les anomalies et mettre en place des systèmes d'alerte efficaces dans le cadre de la maintenance préventive des équipements. Tout d'abord, le capteur DHT11 mesure la température et l'humidité ambiante. Les mesures de température et d'humidité sont ensuite régulièrement enregistrées et transmises à la plateforme OpenBOM PLM. Une fois les données collectées, elles sont analysées pour détecter les anomalies. Des seuils prédéfinis ou des plages normales sont définis pour chaque équipement et les données sont comparées à ces paramètres. Dans notre étude de cas, les seuils de température et d'humidité ambiante prédéfinis pour le compresseur de gaz butane sont les suivants :

- La plage de température recommandée est comprise entre 5°C et 40°C.
- La plage d'humidité idéale se situe entre 40% et 60%.

Si la température ou l'humidité dépasse ces seuils ou sort de ces plages, une alerte est déclenchée pour signaler l'anomalie. Cette alerte sera transmise à l'équipe de maintenance pour la prise de décisions de la maintenance préventive des équipements. De plus, des modèles prédictifs basés sur des données historiques peuvent être utilisés pour prévoir les pannes potentielles ou les problèmes imminents. Par exemple, en analysant les modèles de données passés, il est possible de prédire quand les équipements pourraient tomber en panne. Si une augmentation progressive de la température est détectée sur une période de temps, cela peut indiquer que l'équipement est sur le point de tomber en panne. Ces prédictions permettent de prendre des mesures préventives avant que les pannes ne se produisent, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts associés.

De plus, les données de température et d'humidité permettent des systèmes d'alarme personnalisés. Par exemple, des seuils spécifiques peuvent être définis pour chaque équipement en fonction des spécifications et des exigences de fonctionnement de cet équipement. Cela permet de détecter les anomalies propres à chaque équipement et d'envoyer des alertes précises lorsque ces seuils sont dépassés. Par conséquent, ces informations peuvent conduire à des programmes de maintenance préventive plus efficaces en planifiant une maintenance régulière des équipements et en optimisant les stratégies de maintenance. De plus, grâce à la collecte et à l'analyse continues des données, les programmes de maintenance préventive peuvent être continuellement améliorés, ce qui se traduit par une meilleure disponibilité des équipements, une réduction des temps d'arrêt et des économies de coûts importantes.

## 4.9 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons partagé notre expérience de stage au sein du complexe GP1Z\_Sonatrach et exploré l'importance de la maintenance préventive dans cette entreprise.

Nous avons décrit notre démarche dans le choix de la maintenance préventive des outils de production, en mettant en avant le compresseur de gaz butane comme cas d'étude. Nous avons expliqué les raisons qui nous ont poussés à choisir ce compresseur, notamment sa criticité dans le processus de production et les risques potentiels liés à son dysfonctionnement.

En conclusion, nous avons expliqué comment intégré les données IIoT provenant des capteurs installés sur le compresseur dans la plateforme PLM OpenBOM. Cette intégration nous a permis d'obtenir des données en temps réel sur la température et les vibrations du compresseur, ce qui nous a donné une meilleure visibilité sur son état de fonctionnement, terminant par une démonstration IoT avec notre propre capteur DHT11.

# Conclusion générale

Ce projet a été réalisé dans le but d'intégrer l'IIoT dans un processus PLM. Nous avons commencé par définir le concept de PLM, qui englobe la gestion du cycle de vie d'un produit, et nous avons souligné son rôle essentiel dans les entreprises industrielles. Ensuite, nous avons exploré en détail le concept de l'IoT (Internet des Objets) et approfondi notre compréhension de l'IIoT, en mettant en évidence son rôle crucial dans la maintenance préventive industrielle. Cette compréhension a été renforcée par notre expérience de stage au sein du complexe GP1Z de Sonatrach, où nous avons pu constater directement les avantages de l'IIoT dans le domaine de la maintenance.

Notre travail s'est ensuite concentré spécifiquement sur la maintenance préventive des outils de production, en prenant comme exemple concret un compresseur de gaz butane. Nous avons développé un script basé sur l'automatisation afin d'intégrer les données IIoT de ce compresseur dans la plateforme PLM OpenBOM. Ainsi, On peut analyser les informations relatives à la maintenance préventive de manière plus efficace.

En conclusion, nous sommes convaincus que l'intégration de l'IIoT dans un processus PLM ouvre de vastes perspectives en termes d'optimisation, d'amélioration et d'innovation. Les entreprises qui saisissent ces opportunités peuvent renforcer leur compétitivité sur le marché en offrant des produits de meilleure qualité. En somme, cette combinaison est une opportunité stratégique pour les entreprises qui souhaitent rester compétitives et innovantes dans un environnement industriel en constante évolution.



## Bibliographie

- [1] F. Ameri, D. Dutta. Product lifecycle management: closing the knowledge loops. *Computer-Aided Design and Application*. 2 (5), 577-590 (2005).
- [2] S. Terzi, A. Bouras, D. Dutta, M. Garetti, D. Kiritsis. Product lifecycle management – from its history to its new role. *Int. J. Prod. Gestion du cycle de vie* 4 (4), 360 (2010).
- [3] Barrios, P., Danjou, C., & Eynard, B. (2022). Revue de la littérature et cadre méthodologique pour l'intégration de l'IoT et du PLM dans l'industrie manufacturière. *Informatique dans l'industrie* , 140 , 103688.
- [4] J. Stark. *Product Lifecycle Management: Paradigm for 21st Century Product Realisation*, vol. 1, 3rd edn. Springer, Switzerland (2015).
- [5] A. Saaksvuori. *Product lifecycle management*/Antti Saaksvuori, Anselmi Immonen, 2009.
- [6] Piero Lunghi, Marco Botarelli, Michele Ginocchietti, “An innovative framework based on PLM, RFID & XML Technology for promoting innovation” POMS 18th Annual Conference Dallas, Texas, U.S.A. May 4 to May 7, 2007.
- [7] John Stark. *Product Lifecycle Management. 21st Century Paradigm for Product Realization Second Edition*, Springer.
- [8] S.G. Lee, Y.S. Ma, G.L. Thimm , J. Verstraeten, *Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul*, Science Direct ,*Computers in Industry* 59 (2008) 296–303, Available online 15 August 2007.
- [9] A. Saaksvuori, A. Immonen, *Product Lifecycle Management books second edition*, Springer (2013).
- [10] A. Estruch, C.Vila, H. Siller, F. Romero, J. Abellán. Enabling innovative concurrent engineering and collaborative manufacturing in extended enterprises. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Concurrent Enterprising: ICE 2008*. Centre for Concurrent Enterprise, Nottingham, pp. 759–766 (2008).
- [11] Z. Souheil. *Proposition d'un cadre de modélisation pour les applications PLM Application à la gestion de configuration*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy ,2007.
- [12] B. Eynard, J. Le Duigou, M. Bricogne. *Des SGGT au Product Lifecycle Management*, *Documentaliste Sciences de l'Information*. 51(1), 34-37, 2014.

- [13] M. Abramovici. Future trends in product lifecycle management (PLM). In *The future of product development* (pp. 665-674). Springer, Berlin, Heidelberg (2007).
- [14] Siemens. « Teamcenter Siemens ». [En ligne], 2023, [<https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/products/teamcenter>], (3 février 2023).
- [15] PTC. « Windchill PLM Software ». [En ligne], 2022, [<https://www.ptc.com/en/products/windchill>], (5 février 2023).
- [16] SAP. « Product Lifecycle Management Software ». [En ligne], 2022, [<https://www.sap.com/products/scm/plm-r-d-engineering.html?btp=b4a62c62-0523-4f08a33fe72ebffad5fd> ], (5 février 2023).
- [17] Oracle. « Oracle Product Lifecycle Management (PLM) ». [En ligne], 2023, [<https://www.oracle.com/in/scm/product-lifecycle-management/> ], (6 février 2023).
- [18] Aras. « Conquer product complexity ». [En ligne]. 2022, [<https://www.aras.com/en> ], (9 février 2023).
- [19] Autodesk Fusion. "Fusion 360 manage with upchain: cloud PLM and PDM that easily connects your data, people, and processes". [En ligne]. 2022, [<https://www.autodesk.com/products/fusion-360-manage-withupchain/overview?term=1YEAR&tab=subscription> ], (9 février 2023).
- [20] What is PLM. « What can PLM technology do for enterprises ? ». [En ligne], 2023, [<https://www.techtarget.com/searcherp/feature/What-can-PLM-technology-do-for-enterprises> ], (26 février 2023).
- [21] K. Haseeb, A. Almogren, N. Islam, I. Ud Din, & Z. Jan. An energy-efficient and Secure Routing Protocol for intrusion Avoidance in IoT-Based WSN. *Energies*, 12(21), 4174. (2019).
- [22] N. Hossein Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, & B. Zakeri. Internet of Things (IoT) and the energy sector. *Energies*, 13(2), 494. . (2020).
- [23] P. Gokhale, O. Bhat & S. Bhat. Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1), 41-44. (2018).
- [24] R. Khan, S. U. Khan, R. Zaher & S. Khan. (2012, December). Future Internet : the internet of things architecture, possible applications and key challenges. In *2012 10th international conference on frontiers of information technology* (pp. 257-260). IEEE.
- [25] A. P. Dos Santos, D. W. S. Lima, F. S. Freitas & G. M. da Silva. (2016, October). A motivational study regarding IoT and middleware for health systems. In *Proceedings of the e Tenth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies* (pp. 102-106).
- [26] K. K. Patel, S. M. Patel & P. Scholar. Internet of things-IOT : definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges. *International journal of engineering science and computing*, 6(5). (2016).

- [27] R. Saad. Modèle collaboratif pour l'Internet of Things (IoT) (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi). (2016).
- [28] S. Sahraoui. Mécanismes de sécurité pour l'intégration des RCSFs à l'IoT (Internet of Things) .Doctoral dissertation, Université de Batna 2. (2016).
- [29] H. D. Kotha & V. M. Gupta. IoT application : a Survey. *Int. J. Eng. Technol*, 7(2.7), 891-896. (2018).
- [30] L. Atzori, A. Iera & G. Morabito. The internet of things: A Survey. *Computer networks*, 54(15), 2787-2805. (2010).
- [31] C. Brewster, I. Roussaki, N. Kalatzis, K. Doolin & K. Ellis. IoT in agriculture : Designing a Europe-wide large-scale pilot. *IEEE communications magazine*, 55(9), 26-33. (2017).
- [32] The Internet of Things as a future market. « Internet of Things ». [En ligne], 2022. [ <https://pfau.de/produkt/internet-of-things/> ], (10 février 2023).
- [33] Les fonctions de l'objet connecté. « Comment se compose un système IoT ». [En Ligne], 2022. [ <https://www.connectwave.fr/techno-appli-iot/iot/reseaux-et-infrastructures-iot/> ], (28 janvier 2023).
- [34] S. BEN BACHA, A. DEHEMI & TOUBAL, (2021). Etude et mise en œuvre d'un système IOT basé sur l'ESP8266.
- [35] P. AMBIKA. « Machine learning and deep learning algorithms on the Industrial Internet of Things (IIoT) ». In : *Advances in computers* 117.1. p. 321-338. (2020).
- [36] A. Sharma, A. Singh, N. Sharma, I. Kaushik & B. Bhushan. Security countermeasures in web based application. In *2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)* (Vol. 1, pp. 1236-1241). IEEE. (2019, July).
- [37] Y. Sun, L. Zhang, G. Feng, B. Yang, B. Cao, & M. A. Imran. Block chain-enabled wireless Internet of Things : Performance analysis and optimal communication node deployment. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5791-5802. (2019).
- [38] Park, H., Kim, H., Joo, H., & Song, J. (2016). Recent advancements in the Internet-of-Things related standards : A oneM2M perspective. *Ict Express*, 2(3), 126-129.
- [39] Astarloa, A., Bidarte, U., Jiménez, J., Zuloaga, A., & Lázaro, J. (2016, October). Intelligent gateway for Industry 4.0-compliant production. In *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4902-4907). IEEE.

- [40] Hanafi, I., & Yahia, S. (2020). Conception d'un système IoT de bout en bout pour le suivi temps réel des processus de production, de géolocalisation et de surveillance (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [41] Hassija, V., Chamola, V., Saxena, V., Jain, D., Goyal, P., & Sikdar, B. (2019). A survey on IoT security : application areas, security threats, and solution architectures. *IEEE Access*, 7, 82721-82743.
- [42] Lee, E., Seo, Y. D., & Kim, Y. G. (2022). Self-Adaptive Framework With Master–Slave Architecture for Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(17), 16472-16493.
- [43] J. Zheng, D. Simplot-Ryl, C. Bisdikian, and H. Mouftah, “The Internet of Things,” in *IEEE Communications Magazine*, Volume :49, Issue : 11, pp :30-31, 2011.
- [44] Huang, Y., & Li, G. (2010, August). Descriptive models for Internet of Things. In 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing (pp. 483-486). IEEE. [45] Fan, T., & Chen, Y. (2010, September). A scheme of data management in the Internet of Things. In 2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (pp. 110114). IEEE.
- [46] L. Tan and N. Wang, “Future Internet: The Internet of Things,” in 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), August 2010.
- [47] M. Wu, T. Lu, F. Ling, J. Sun, and H. Du, “Research on the Architecture of Internet of Things,” in 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), Aug. 2010.
- [48] Debasis Bandyopadhyay , Jaydip Sen ,” Internet of Things - Applications and Challenges in Technology and Standardization”, *Wireless Pers Commum*,9 April 2011.
- [49] Ying Zhang, ”Technology Framework of the Internet of THings and Its Application,” in *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2011, pp. 4109-4112.
- [50] Tampering is the form of attack in which the node data can be extracted or altered by the attacker to make a controllable node.
- [51] I. ROXIN, A. BOUCHEREAU. “Ecosystème de l’Internet des Objets”, dans Bouhaï N. et Saleh I., (dir.) “Internet des objets : Evolutions et Innovations ”, ISTE Editions Londres, Mai 2017.
- [52] Sasajima, Hisashi, Toru Ishikuma, and Hisanori Hayashi. 'Future IIOT in process automation Latest trends of standardization in industrial automation, IEC/TC65.' Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2015 54th Annual Conference of the. IEEE, 2015.
- [53] C. Yang, W. Shen et X. Wang. « Applications of Internet of Things in manufacturing ». In: 2016 IEEE 20th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design.

- [54] F. Shrouf, J. Ordieres et G. Miragliotta. « Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm ». In : 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. (Déc 2014). p. 697-701.
- [55] K. Wang et al. « Green Industrial Internet of Things Architecture : An Energy Efficient Perspective ». In : IEEE Communications Magazine 54.12 (déc. 2016), p. 48- 54.
- [56] Xiaoli Xu, Tao Chen et Mamoru Minami. « Intelligent fault prediction system based on internet of things ». In : Computers & Mathematics with Applications. Advanced Technologies in Computer, Consumer and Control 64.5 (1er sept. 2012), p. 833- 839.
- [57] N. Jazdi. « Cyber physical systems in the context of Industry 4.0 ». In : 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. (Mai 2014), p. 1-4.
- [58] S. Chen, H. Xu, D. Liu, B. Hu, & H. Wang. A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with china perspective. *IEEE Internet of Things journal*, 1(4), 349-359. (2014).
- [59] S. Sahraoui. Mécanismes de sécurité pour l'intégration des RCSFs à l'IoT (*Internet of Things*). Doctoral dissertation, Université de Batna 2. (2016).
- [60] Cabarbaye, André, and Cabarbaye, Aurélien. Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive. France, Cab Innovation Editeur, 2021.
- [61] Francastel, Jean-Claude. *Ingénierie de la maintenance-2ème édition : De la conception à l'exploitation d'un bien*. Dunod, 2009.
- [62] KHALDI, Sara et SEKIOU, Sihem. *Élaboration d'un plan de maintenance préventive d'une machine de fraisage*. 2021. Thèse de doctorat.
- [63] Hachem mohammed chérif, laimeche hadj abdellah, « présentation d'une gamme d'entretien préventive d'une fraiseuse de type 6 p 13 », mémoire de fin d'étude, université kasdi merbah–ouargla.
- [64] Y. khiyi, w. erroudi, « élaboration d'un plan de maintenance préventive », projet de fin d'études, faculté des sciences et techniques de fès.
- [65] Devarun ghosh, sandip roy, maintenance optimization using probabilistic cost benefit analysis. *Journal of loss prevention in the process industries* 2009 ; 22(4) : 403-407.
- [66] Chibane noureddine, « etude, diagnostic et réparation de la fraiseuse universelle weyrauch fr-u-1100 du hall de technologie de la faculte », memoire présenté pour l'obtention du diplôme de master, université aboubakr belkaïd– tlemcen.
- [67] Abbou r, contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée : conception et optimisation d'un atelier de maintenance. Thèse de doctorat, université joseph fourier, grenoble, france. 2003.

- [68] Monchy, F., & Vernier, J. P. (2010). *Maintenance-3e éd.: Méthodes et organisations*. Hachette.
- [69] Addoun abdelkrim, « optimisation de la maintenance par la méthode amdec appliquée au ventilateur de l'entreprise alzinc », mémoire de fin d'étude, université aboubakr belkaïd tlemcen
- [70] KAMEL, CHERROUN. Etude de la Maintenance Industrielles. 2020.
- [71] HELLER, Thomas. Smart Maintenance—Der Weg vom Status quo zur Zielvision. 2019.
- [72] AYAD, Soheyb, TERRISSA, Labib Sadek, et ZERHOUNI, Nouredine. An IoT approach for a smart maintenance. In : *2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)*. IEEE, 2018. p. 210-214.
- [73] SENEVIRATNE, Dammika, CIANI, Lorenzo, CATELANI, Marcantonio, *et al.* Smart maintenance and inspection of linear assets: An Industry 4.0 approach. *Acta Imeko*, 2018.
- [74] BARRIOS, Piers, EYNARD, Benoit, et DANJOU, Christophe. Towards a digital thread between industrial internet of things and product lifecycle management: experimental work for prototype implementation. In : *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era: 16th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2019, Moscow, Russia, July 8–12, 2019, Revised Selected Papers 16*. Springer International Publishing, 2019. p. 273-282.
- [75] RAJESH, P. K., MANIKANDAN, N., RAMSHANKAR, C. S., *et al.* Digital twin of an automotive brake pad for predictive maintenance. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 165, p. 18-24.
- [76] ZHANG, Yingfeng, REN, Shan, LIU, Yang, *et al.* A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of cleaner production*, 2017, vol. 142, p. 626-641.
- [77] YOO, Min-Jung, GROZEL, Clément, et KIRITSIS, Dimitris. Closed-loop lifecycle management of service and product in the internet of things: Semantic framework for knowledge integration. *Sensors*, 2016, vol. 16, no 7, p. 1053.
- [78] CAI, Hongming, DA XU, Li, XU, Boyi, *et al.* IoT-based configurable information service platform for product lifecycle management. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2014, vol. 10, no 2, p. 1558-1567.
- [79] REN, Shan et ZHAO, Xin. A predictive maintenance method for products based on big data analysis. In : *International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications (MEITA 2015)*. Atlantis Press, 2015. p. 385-390.
- [80] Kiritsis, D. (2011). Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things. *Computer-Aided Design*, 43(5), 479-501.

- [81] Penciu, D., Le Duigou, J., Daaboul, J., Vallet, F., & Eynard, B. (2016). Product life cycle management approach for integration of engineering design and life cycle engineering. *AI EDAM*, 30(4), 379-389.
- [82] Kunz, S., Brecht, F., Fabian, B., Aleksy, M., & Wauer, M. (2010, April). Aletheia-- Improving industrial service lifecycle management by semantic data federations. In *2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications* (pp. 1308-1314). IEEE.
- [83] Wuest, T., Hribernik, K., & Thoben, K. D. (2012). Can a product have a Facebook? A new perspective on product avatars in product lifecycle management. In *Product Lifecycle Management. Towards Knowledge-Rich Enterprises: IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2012, Montreal, QC, Canada, July 9-11, 2012, Revised Selected Papers 9* (pp. 400-410). Springer Berlin Heidelberg.
- [84] Luo, Y. S., Yang, Y., Li, Y. Z., & Wang, X. J. (2012). Information network of CL PLM based on the internet of things. In *Advanced Materials Research* (Vol. 421, pp. 499-502). Trans Tech Publications Ltd.
- [85] Främling, K., Kubler, S., & Buda, A. (2014). Universal messaging standards for the IoT from a lifecycle management perspective. *IEEE Internet of things journal*, 1(4), 319-327.
- [86] Ren, S., & Zhao, X. (2015, August). A predictive maintenance method for products based on big data analysis. In *International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications (MEITA 2015)* (pp. 385-390). Atlantis Press.
- [87] Duan, D.-H., Deng, J.-X., Wu, F.-H., 2015. An architecture of product operational cycle management system. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering And Mechanical Automation (ICEEMA 2015)*. DESTECH PUBLICATIONS, INC, pp. 510–4.
- [88] Hribernik, K., van der Vegte, W.F., Kiritsis, D., Thoben, K.-D., 2016. Towards a methodology for selecting product usage information sources for the (re-)design of product service systems. In: Kristensen, K., Bierwolf, R., Romero, D., Abrahamsson, P. (éds.), *2016 International Conference on Engineering, Technology and Innovation/IEEE International Technology Management Conference (ICE/ITMC)*. IEEE.
- [89] Lewandowski, M., Thoben, K.-D., 2016. Information gathering in closed-loop PLM systems— social networks as models for the internet of things? In: Harik, R., Rivest, L., Bernard, A., Eynard, B., Bouras, A. (Eds.), *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries 492*. Springer International Publishing, pp. 488–497.
- [90] Shariatzadeh, N., Lundholm, T., Lindberg, L., Sivard, G., 2016. Integration of digital factory with smart factory based on internet of things. *Procedia CIRP* 50, 512–517.
- [91] Lewandowski, M., Thoben, K.-D., 2016. Information gathering in closed-loop PLM systems— social networks as models for the internet of things? In: Harik, R., Rivest, L., Bernard, A., Eynard, B., Bouras, A. (Eds.), *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries 492*. Springer International Publishing, pp. 488–497.

- [92] Kim, Y.-W., Chang, T.-W., Park, J., 2017. Gen2 RFID-based system framework for resource circulation in closed-loop supply chains. *Sustainability*, 9(11).
- [93] Zhou, Z., Liu, X., Pei, J., Pardalos, P.M., Liu, L., Fu, C., 2017. Real options approach to explore the effect of organizational change on IoT development project. *Optim. Lett.* 11 (5), 995–1011.
- [94] Sodhro, A.H., Pirbhulal, S., Sangaiah, A.K., 2018. Convergence of IoT and product lifecycle management in medical health care. *Future Gener. Comput. Syst.* 86, 380–391.
- [95] Kumar, V.V., Sahoo, A., Liou, F.W., 2019. Cyber-enabled product lifecycle management: a multiagent framework. *Procedia Manuf.* 39, 123–131.
- [96] Liu, X.L., Wang, W.M., Guo, H., Barenji, A.V., Li, Z., Huang, G.Q., 2020. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 63, 101897.
- [97] Yousefnezhad, N., Malhi, A., Kinnunen, T., Huotari, M., Framling, K., 2020. Product lifecycle information management with digital twin: a case study. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2020-July, pp. 321–6.
- [98] Labbi, O., Ahmadi, A., 2021. Plm and smart technologies for product and supply chain design. *Adv. Intell. Syst. Comput.* 1193, 149–160.
- [99] Pradhan, R., & Mohanta, H. C. (2020). A Novel IIoT Based ERP-PLM System for MSME of Indian Market. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*, 17(9), 2262-2273.
- [100]Ren, S., & Zhao, X. (2015, August). A predictive maintenance method for products based on big data analysis. In *International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications (MEITA 2015)* (pp. 385-390). Atlantis Press.
- [101]Abramovici, M., (2007). Future trends in product lifecycle management (PLM). In *The future of product development* (pp. 665-674). Springer Berlin Heidelberg.
- [102]Gartner Inc., 2017, IT Glossary - Internet of Things, <http://www.gartner.com/itglossary/internetof-things/>, 2017.
- [103]Jingran Li, Fei Tao, Ying Cheng et Liangjin Zhao. (2015) "Big Data dans la gestion du cycle de vie des produits." *Journal international des technologies de fabrication avancées* 81 (1–4): 667–684.
- [104] Yingfeng Zhang, Shan Ren, Yang Liu, Tomohiko Sakao et Donald Huisingh. (2017) "Un cadre pour la gestion du cycle de vie des produits basée sur le Big Data." *Journal de la production plus propre* 159: 229–240.
- [105] Nikolaos Madenas. (2014) "Intégration des systèmes de gestion du cycle de vie des produits avec les informations de maintenance dans toute la chaîne d'approvisionnement pour l'analyse des causes profondes." *Université de Cranfield*, 2014.



- [106] Abramovici M., et Lindner A. (2011) "Fournir des connaissances sur l'utilisation des produits pour la conception de générations de produits améliorées."Annales du CIRP - Technologie de fabrication60 (1): 211–214.
- [107] Nos activités « Sonatrach ». [En ligne], 2023. [ <https://sonatrach.com/nos-activites> ], (11 juin 2023).
- [108] Cloud PLM & PDM pour gérer les fichiers, les pièces, les nomenclatures, l'inventaire et les achats « OpenBom ». [En ligne], 2023. [ <https://www.openbom.com/> ], (13 juin 2023).
- [109] Éditeur Web Arduino « Arduino ». [En ligne], 2023. [ <https://www.arduino.cc/en/software> ], (12 juin 2023).
- [110] PLX-DAQ « Parallax ». [En ligne], 2023 [ <https://www.parallax.com/package/plx-daq/> ], (12 juin 2023).
- [111] Capteur de température et d'humidité DHT11 Arduino « ARDUINO France ». [En ligne], 2023 [ <https://arduino-france.site/dht11-arduino/> ], (11 juin 2023).
- [112] CARTE ARDUINO « Arduino ». [En ligne], 2023 [ <https://www.arduino.cc/> ], (12 juin 2023).
- [113] Smith, Alan G. "Introduction à l'arduino." (2011).
- [114] CHEHAIDIA, Zahira. BENABDI, Rekia. « Etude de la performance de la section séparation au niveau du complexe GP1/Z », mémoire de fin d'étude, université Abd el hamid Ibn badis Mostaganem.