

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

en : Génie Mécanique

Spécialité : Assemblages soudés et matériaux

Présenté par : BENAICHA Boucif

Sujet

La maintenance 4.0 au service de l'entreprise du futur

Soutenu publiquement, le 18/06/2025, devant le jury composé de :

M.HADJOUI Abdelhamid

Professeur

Univ. Tlemcen

Président du jury

M.GUEZZEN Samir

MCA

Univ. Tlemcen

Examineur

M.MAMI Elias Fouad

MCB

Univ. Tlemcen

Encadreur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Ce travail a été développé grâce aux conseils, aux orientations et à l'assistance de Monsieur MAMI Elias Fouad à qui j'adresse mes remerciements les plus vifs.

Je tiens à remercier également Monsieur GUEZZEN Samir pour l'examen de ce travail. Je tiens à remercier Monsieur HADJOUI Abdelhamid pour avoir accepté de présider le jury.

Ma reconnaissance et mes remerciements s'adressent aussi à tous les Enseignants et les Responsables des équipes pédagogiques du département de Génie Mécanique de la Faculté de Technologie de l'université ABOUBEKR Belkaid de Tlemcen.

Merci enfin, à toutes les personnes qui m'ont encouragé et aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Ce mémoire est dédié à :

- mes chers parents.
- mon grand frère.
- à ma famille.
- et à tous ce qui m'ont encouragé pour l'accomplissement de ce travail.

Résumé

Le but de ce mémoire consiste à étudier et à présenter une approche pour la mise en œuvre progressive de la maintenance 4.0 au sein de l'entreprise du futur, dans le cadre de l'industrie 4.0.

Ce travail passe en revue les conditions, les outils et les briques technologiques nécessaires pour la concrétisation de ce projet, tout en tenant compte du facteur humain ainsi que du degré de maturation de la culture numérique.

Mots-clés :

Maintenance 4.0, entreprise du futur, industrie 4.0, briques technologiques, culture numérique.

Abstract

The aim of this thesis is to study and present an approach that progressively implements maintenance 4.0 within the company of the future, within the framework of industry 4.0

This work reviewed the conditions, tools and technological building blocks necessary for the realization of this project, taking into account the human factor as well as the degree of maturation and digital culture.

Keywords :

Maintenance 4.0, company of the future, industry 4.0, technological building blocks, digital culture.

ملخص

تهدف هذه المذكرة الى دراسة وتقديم طريقة تنفيذ تدريجيا الصيانة 4.0 داخل مؤسسة المستقبل في إطار الصناعة 4.0

يستعرض هذا العمل الظروف والأدوات واللابئات التكنولوجية اللازمة لإنجاز هذا المشروع، وهذا مع الأخذ بعين الاعتبار العامل البشري ودرجة النضج وكذلك الثقافة الرقمية.

الكلمات المفتاحية :

الصيانة 4.0، مؤسسة المستقبل، الصناعة 4.0، اللابئات التكنولوجية، الثقافة الرقمية.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Sommaire	VI
Listes des figures	VII
Listes des tableaux	VIII
Listes des abréviations	IX
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Evolution et importance de la maintenance dans l'entreprise.

1.1. Approche et définitions de la maintenance.....	5
1.2. Historique et mutation de la maintenance.....	5
1.3. Formes de la maintenance.....	8
1.3.1.1. Maintenance corrective.....	8
1.3.1.1.1. Maintenance palliative.....	8
1.3.1.1.2. Maintenance curative.....	8
1.3.1.2. Maintenance préventive.....	9
1.3.1.2.1. Maintenance préventive systématique.....	9
1.3.1.2.2. Maintenance préventive conditionnelle.....	9
1.3.1.3. Maintenance d'amélioration.....	9
1.4. Maintenance 4.0.....	10
1.4.1. Evolution de la maintenance 4.0.....	10
1.4.2. Définition de la maintenance 4.0.....	10
1.4.3. Caractéristiques de la maintenance 4.0.....	11

Chapitre 2 : Entreprise et culture numérique.

2.1. Définition de l'entreprise.....	13
2.2. Définition de la culture numérique.....	14
2.3. Caractéristiques de la culture numérique.....	14

2.4. Vecteurs d'innovation et de coordination.....	15
2.5. Industrie et entreprise du futur.....	16
2.5.1. Définitions.....	16
2.5.1.1. Industrie du futur.....	16
2.5.1.2. Entreprise du futur.....	17

Chapitre 3 : Briques technologiques de l'industrie 4.0

3.1. Définition et caractéristiques du Big Data.....	19
3.1.1. Définition du Big Data.....	19
3.1.2. Caractéristiques du Big Data.....	20
3.2. Cloud computing.....	21
3.3. Robotique et cobotique.....	21
3.4. Jumeaux numériques.....	21

Chapitre 4 : Piliers et technologies utilisés dans la maintenance 4.0.

4.1. Principaux piliers de la maintenance 4.0.....	23
4.1.1. 1 ^{er} pilier.....	23
4.1.2. 2 ^{ème} pilier.....	23
4.1.3. 3 ^{ème} pilier.....	23
4.2. Intelligence Artificielle (IA).....	24
4.3. Internet des Objets (IOT).....	25
4.4. Capteurs intelligents.....	27
4.5. Apprentissage automatique.....	27
4.6. Réalité augmentée.....	28
4.7. Tablettes numérique / Smartphones.....	28
4.8. Utilisation de la maintenance prévisionnelle	29
4.9 Impression 3D.....	29
4.10. Appui sur la TPM et la GMAO.....	30
4.10.1. Alignement de la TPM.....	30
4.10.2. Implication de la GMAO.....	31

Chapitre 5 : Normalisation et cybersécurité.

5.1. Contribution des normes.....	33
- Solutions de cybersécurité avancées.....	34
- Réglementations et formation du personnel.....	34
5.2. Norme d'interopérabilité.....	34
5.3. Maitrise des risques.....	35
5.4. Sécurité des données.....	36

Chapitre 6 : Démarche de mise en œuvre progressive de la maintenance 4.0.

6.1. Digitalisation de la maintenance.....	38
6.1.1. Plan de maintenance avant digitalisation.....	38
6.1.2. Etapes.....	39
6.1.3. Conditions de réussite de la digitalisation.....	40
6.2. Digitalisation de la documentation et des procédures.....	41
6.3. Communication.....	41
6.3.1. Analyse éthique.....	41
6.3.2. Echange des données.....	42
6.3.3. Choix des outils.....	42
6.4. Formation.....	43
6.4.1. Compétence.....	43
6.4.2. Métiers.....	43
6.4.3. Rôles spécifiques dans la maintenance 4.0.....	44
6.4.3.1. Autres formations.....	45

Chapitre 7 : Impact de la maintenance 4.0 sur l'efficacité opérationnelle de l'entreprise.

7.1. Maintenance et développement durable.....	47
7.2. Impact de la maintenance 4.0 sur l'environnement.....	48
7.3. Optimisation de la consommation énergétique.....	49

Chapitre 8 : Place de l'humain dans l'industrie et la maintenance 4.0.

8.1. Conduite du changement.....	49
8.2. Implication des travailleurs.....	50
8.3. Développement de la culture d'entreprise.....	51
8.4. Ethique et entreprise 4.0.....	51
Conclusion générale.....	53
Bibliographie.....	54
Webographie.....	57

Liste des figures

Figure 1.1 : Nombre de publications étudiées et leurs citations

Figure 2.1 : Différents types de maintenance.

Figure 3.1 : Développement de la fonction industrielle.

Figure 4.2 : Développement de l'industrie 4.0.

Figure 5.2 : Entreprise du futur.

Figure 6.3 : cobotique.

Figure 7.3 : Jumeaux numériques.

Figure 8.4 : Pays avec les plus d'appareils IoT.

Figure 9.4 : capteur intelligent.

Figure 10.4 : Imprimant 3D.

Figure 11.4 : Les 8 Piliers du TPM.

Figure 12.5 : Sécurité des données.

Figure 13.6 : 6 étapes vers un apprentissage progressif.

Figure 14.6 : Technicien de maintenance industrielle.

Figure 15.7 : Energie éolienne.

Figure 16.8 : Conduite du changement.

Figure 17.8 : Ethique et industrie 4.0.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Publications récentes sur la maintenance 4.0.

Liste des abréviations

LCC : Life Cycle Cost.

TPM : Total Productive Maintenance.

CEN : Comité Européen de Normalisation.

AFNOR : Association Française de Normalisation.

SQL : Structured Query Language.

RFID : Radio Frequency Identification.

GPS : Global Positioning System.

SGBD : Système de Gestion de Base de Données.

MBF : Maintenance Basée sur la Fiabilité.

IOT : Internet of Things.

RUL : Remaining Useful Life.

GMAO : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur.

IETF : Internet Engineering Task Force.

HTTP : Hyper texte Transfer Protocol.

M2M : Machine to Machine.

RA : Réalité Augmentée.

EDI : Echange de Données Informatisées.

SQ ; Système Qualité.

RUL : Remaining Useful Life.

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance industrielle, une fonction stratégique de l'entreprise est en constante évolution. Sous-estimée dans le passé, elle est devenue de nos jours un centre de profit, un facteur de qualité et une source de productivité dans les entreprises de production. Aujourd'hui, elle se retrouve directement concernée par l'industrie du futur en devenant une maintenance intelligente et connectée, appelée également «Smart maintenance».

Les machines connectées sont devenues le cœur de l'usine intelligente. Parce qu'elles peuvent transmettre la bonne information en temps réel et au bon moment, nous entrons ainsi dans l'ère de la digitalisation des procédures et de la maintenance 4.0.

Cette nouvelle forme de maintenance est une approche industrielle qui exploite les technologies gravitant autour de l'industrie 4.0.

Grâce à l'intelligence artificielle et aux technologies avancées, c'est le stade le plus avancé en termes de management de la maintenance industrielle. En s'appuyant sur les nouvelles technologies et les méthodes complémentaires, cette nouvelle forme de maintenance permet à l'entreprise d'atteindre des performances exceptionnelles.

L'étude proposée explore les principales briques technologiques pour la mise en œuvre de la maintenance du futur, elle permet aussi de dégager une vision sur la maintenance 4.0 et d'indiquer les procédures de sa digitalisation et de sa mise en place.

Ce travail présente également l'impact de la maintenance 4.0 sur l'efficacité opérationnelle de l'entreprise.

Naturellement, le projet ambitieux de mise en œuvre de cette maintenance 4.0 ne peut être réalisable avec succès sans la prise en compte de la normalisation de la cybersécurité, de la culture d'entreprise ainsi que du facteur humain.

A/ Problématique

Notre problématique est de nature technique et socioculturelle.

Nous prouvons l'énoncer de la manière suivante :

« Comment peut-on mettre en œuvre la maintenance 4.0 dans le cadre de l'industrie du futur, tout en tenant compte du facteur humain ? ».

Introduction générale

B/ Constats

- Coûts de maintenance élevés.
- Rareté d'une main d'œuvre hautement qualifiée et plus disciplinaire en maintenance.
- Interactions et communication insuffisante.
- Lacunes dans la prise de décision en temps réel.
- Tendance à privilégier la production au détriment d'une maintenance digitalisée.

C/ Contexte de l'étude

- Hypothèse principale.

Il est possible de mettre en œuvre une maintenance 4.0 à moindre coût, dans un délai raisonnable, en tenant compte de la culture numérique de l'entreprise.

D/ Objectifs du mémoire

- Etudier, définir et présenter une méthodologie pour l'implantation progressive de la maintenance 4.0.
- Explorer les normes existantes liées au sujet.
- Adapter la démarche au contexte, aux réalités et à la culture d'entreprise.

E/ Choix et opportunité du sujet

En consultant les sujets de mémoires de fin d'études proposés et après une réflexion sur l'importance de la maintenance dans l'entreprise, nous nous sommes vite aperçus que le sujet était pertinent et d'actualité.

Le choix du sujet a été guidé par notre passion et notre intérêt pour la maintenance industrielle, source de grande employabilité ainsi que par la qualité de mes encadreurs.

D'autre part, pour une étude complète et qui se veut objective, nous nous sommes vite rendu compte que nous ne pouvons pas traiter uniquement le côté technique étant donné que le sujet en lui-même recouvre un ensemble de paramètres tels que le facteur humain, le niveau de maturation dans la culture numérique ainsi que la formation.

Introduction générale

F/ Démarche

Notre travail doit être judicieusement structuré. Pour cela, notre démarche qui se veut être méthodique repose sur une étude bibliographique liée à notre sujet, notamment sur l'industrie et l'entreprise du futur ainsi qu'à la maintenance 4.0.

La méthode utilisée dans ce travail fait appel à la coordination de l'exploitation des documents en langue française (mémoires, livres, articles, revues, internet) et des publications en anglais.

G/ Etude bibliographique - Etat de l'art

Grâce à la consultation et à la lecture de nombreux documents (mémoires, livres, revues, publications, internet), nous avons pu recenser des auteurs ayant travaillé et publié dans les domaines qui nous intéressent.

Tableau 1 : Publications récentes sur la maintenance 4.0

Auteurs	Année	Commentaires/ observation
KACZMAREK M.J. et autres	2020	Prise en considération de la maintenance intelligente et durable.
DI NARDO M. et autres	2021	Evolution de la maintenance dans l'industrie et ses applications.
RODA I. et autres	2021	Proposition d'une maintenance avancée comme une approche intégrale du concept e-maintenance à la maintenance 4.0.
SHAHEEN B.W et autres	2022	Influence des technologies de l'industrie sur les différentes fonctions des systèmes de management de la maintenance.
WOJCIECHOWSKA S.W. et autres	2023	Etude et compréhension des nouvelles approches liées à la maintenance 4.0.
SARJE S.H. et autres	2025	Recherche de l'état de l'art des IOT activé pour une maintenance 4.0 et durable.

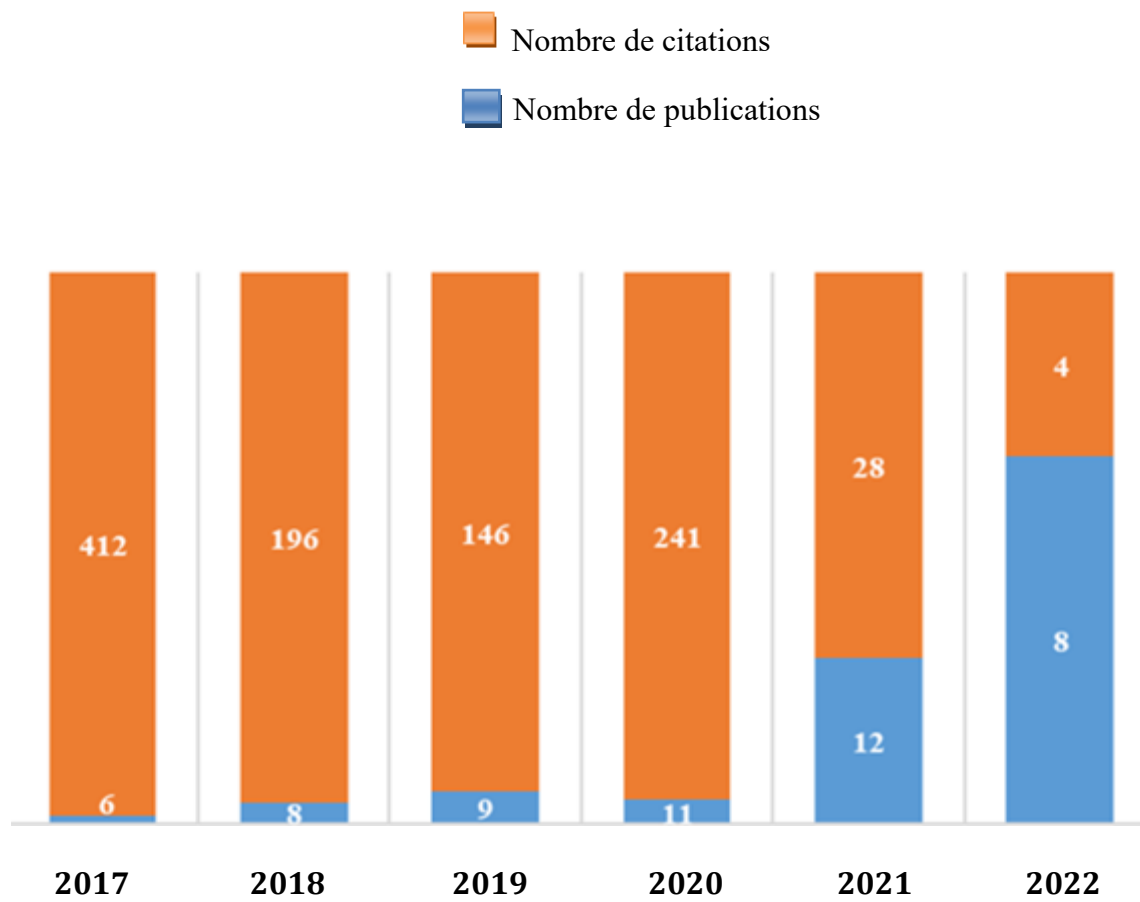


Figure 1.1 : Nombre de publications étudiées et leurs citations [27]

Chapitre 1 :
Evolution et importance
de la maintenance dans l'entreprise.

Introduction

La maintenance occupe une place privilégiée dans une stratégie de développement d'un pays en situation d'une économie de marché. Face aux nouveaux défis qui les attendent, les entreprises de production doivent revoir et adapter leur stratégie à la nouvelle situation économique, Aujourd'hui, les équipements bénéficient de progrès technologiques et leur maintenance exige compétence et savoir-faire de plus en plus poussés.

La maintenance industrielle est en constante évolution, on entre actuellement dans l'ère de la maintenance 4.0.

1.1. Approche et définitions de la maintenance

D'après le dictionnaire Larousse, la maintenance peut être définie comme étant un « ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement ». De son côté, l'AFNOR (NF X 60-010) l'a définie comme un « ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé » La norme NF EN 13306 (juin 2001) quant à elle, la définit comme suit : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [1]

1.2. Historique et mutation de la maintenance

Les années 1960/1970 ont généré trois mouvements :

-la naissance de la maintenance par diagnostic que l'on baptisera, plus tard, maintenance conditionnelle ou maintenance prédictive (prévisionnelle).

Il s'agit de mettre en application les techniques de contrôle non destructifs (ultrasons, gammagraphie, radiographie, courant de Foucault ...) les contrôles de vibrations, les analyses d'huiles, la thermographie infrarouge...

La prise en compte de l'aspect économique dans la définition des démarches de maintenance, tout équipement pour lequel une panne ou un dysfonctionnement diminue de manière significative la quantité ou la qualité des produits fabriqués est considérée comme critique.

Chapitre 1 : Evolution et importance de la maintenance dans l'entreprise.

La notion de coût de défaillance apparait ; l'incidence financière indirecte de l'équipement est intégrée. On appelle cela aujourd'hui les coûts de non-maintenance. La considération de l'enjeu économique, si elle est nécessaire au moment de la détermination des actions de maintenance, n'est pas suffisante : il faut aussi évaluer le risque et la probabilité de défaillance.

Dans les années 1970 à nos jours, on notera successivement le développement de deux philosophies de la maintenance :

-aux Etats Unis, la mise en application du concept de Life Cycle Cost (Coût du cycle de vie d'un équipement ou matériel ou LCC).

Le LCC est constitué par la totalité des coûts occasionnés par le processus de conception, développement, exploitation, maintenance et soutien logistique de tout système pendant sa durée de vie. Cela consiste à cumuler le coût initial d'acquisition de l'équipement (conception et construction) avec les coûts de fonctionnement (exploitation et maintenance), la recherche du LCC minimum s'applique d'avantages à la gestion d'un parc de matériels et installations ; il intègre cette discipline appelée logistique dans laquelle la maintenance est associée aux achats, au stockage, au transport...

-Un autre mouvement, depuis 1985, a vu sa naissance au Japon en 1970 ; la maintenance productive totale ou TPM (Total productive Maintenance), autant le LCC est une approche économique de la maintenance, autant la TPM une approche humaine.

Le service maintenance est l'aboutissement d'une évolution opérée à partir de l'existant : les services entretien traditionnels. Présents dans l'industrie à partir du début de l'ère industrielle, les services entretien sont alors une sous-fonction de la production. Souvent excentrés dans l'entreprise, ils reposent sur des métiers : dépanneurs mécaniciens, dépanneurs électriciens, graisseurs et réglers travaillent séparément et sont souvent en conflit avec le service production. L'entretien consistait majoritairement à dépanner et à réparer après défaillance, avec le souci d'un redémarrage rapide, en n'ayant comme objectif préventif que le minimum vital : lubrification et rondes de surveillance. L'image de la maintenance pourrait être celle d'un agent des méthodes réfléchissant au moyen de ne plus avoir à dépanner.

La structuration des services « maintenance » s'est fondée sur des concepts et des méthodes radicalement en rupture avec les usages de l'entretien. Le besoin émergent qu'il était impératif de satisfaire était la sécurité des exploitants, mais aussi des usagers et des utilisateurs. Il est donc naturel que les initiateurs de la maintenance aient été des

domaines à risques, tels que : les transports (Rail, marine et aéronautique), la pétrochimie, le nucléaire. Pour les responsables de ces domaines, entretenir le matériel en subissant son comportement devenait inadapté face aux risques encourus : il leur fallait apprendre à maîtriser ces systèmes automatisés, à prévenir les incidents pour éviter les accidents, tout en évitant des surcoûts prohibitifs. Il faut remarquer qu'avant 1980, ces expériences de structuration de la maintenance se faisaient dans une logique sectorielle, le cloisonnement entre entreprises étant fort. C'est à partir de 1979 que sortirent les premières normes de maintenance AFNOR de la série X 60, la norme générale relative à la fonction maintenance X 60 000 datant de février 1985. A partir de 1994, la volonté de normaliser les activités de maintenance toucha l'Europe par les travaux du Comité Européen de Normalisation (CEN). Les années 1980 virent les entreprises obligées de s'adapter à des marchés plus fluctuants et élargis, voire mondialisés. La réactivité aux marchés devint prépondérante, entraînant la mise en œuvre de concepts nouveaux concernant l'organisation de la production aussi bien que l'organisation de la maintenance. C'est en particulier le cas de la « maintenance productive », importée du Japon à la même époque vint la recherche de la qualité : compétitivité par le meilleur ratio qualité/prix possible et la mise en place de l'assurance qualité. C'est à partir de 1987 que les premières entreprises furent certifiées ISO 9000. Cette assurance de la qualité concerne les services « maintenance » dans la structuration de leurs méthodes et procédures. Les normes ISO 14000 représentent depuis 1996 un nouveau défi, mettant la maintenance de l'outil industriel au service de la productivité dans le respect de l'environnement. A partir de 1980 se mit également en place la production « juste à temps » associée à la recherche du zéro défaut et des zéro panne, notamment en maintenance. Aujourd'hui, la performance industrielle passe par une convergence d'objectif entre la production et la maintenance. L'année 1990, voit l'ouverture des activités tertiaires. Les méthodes de la maintenance industrielle sont alors transférées vers les groupes d'assurance, les groupes commerciaux et les hôpitaux.

[1],[19][2][3]

1.3. Formes de la maintenance

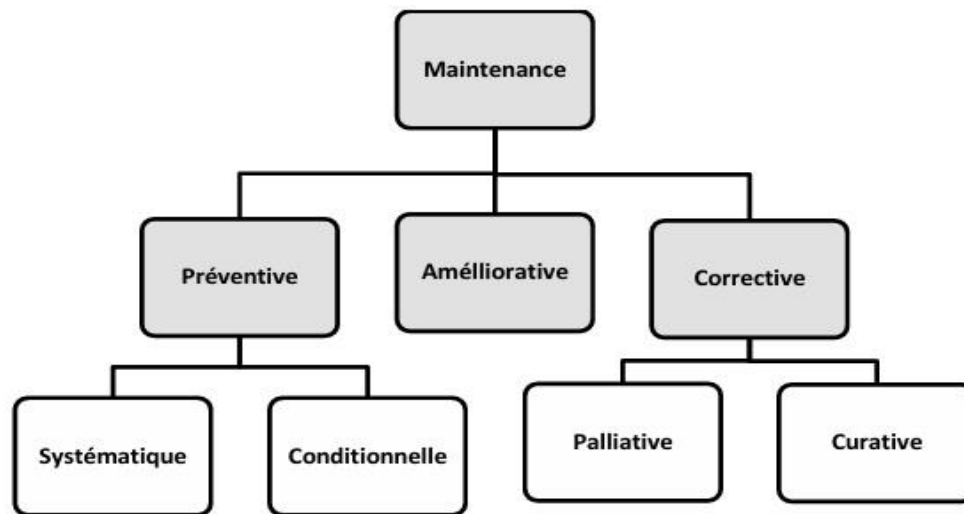


Figure 2.1 : Différents types de maintenance. [18]

1.3.1. Maintenance corrective

Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

La maintenance corrective comprend en particulier :

- la localisation de la défaillance et son diagnostic.
- la remise en état avec ou sans modification.
- le contrôle du bon fonctionnement.

1.3.1.1. Maintenance palliative

Ensemble des activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise. Appelée couramment « dépannage », la maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

1.3.1.2 Maintenance curative

Activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise.

Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

Ces activités peuvent être :

- des réparations.
- des modifications ou améliorations ayant pour objet de supprimer les défaillances.

1.3.2. Maintenance préventive

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu.

Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage ; et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service.

1.3.2.1. Maintenance préventive systématique

Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage.

1.3.2.2. Maintenance préventive conditionnelle

Maintenance préventive subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen.

1.3.3. Maintenance d'amélioration

L'amélioration des biens d'équipements qui consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspond à la maintenance d'amélioration. Dans ce domaine beaucoup de choses restent à faire. C'est un état d'esprit qui nécessite une attitude créative. Cette créativité impose la critique. Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel ; l'augmentation de la fiabilité, c'est-à-dire diminuer les fréquences d'interventions ; l'amélioration de la maintenabilité, la standardisation de certains éléments pour avoir une politique plus cohérente et améliorer les actions de maintenance, l'augmentation de la sécurité du personnel. Tous les matériels sont concernés à condition que la rentabilité soit vérifiée. Cependant une petite restriction pour les matériels à renouveler dont l'état est proche de la réforme, pour usure généralisée ou par obsolescence technique. Même si ces activités sortent du cadre direct de la maintenance, elles s'intègrent bien dans le champ de compétence des professionnels de maintenance. En période de crise économique, certains industriels peuvent se montrer prudents à l'égard des investissements et trouvent des possibilités d'amélioration par l'intermédiaire de ces formes de maintenance.[20]

1.4. Maintenance 4.0

1.4.1. Evolution de la maintenance 4.0

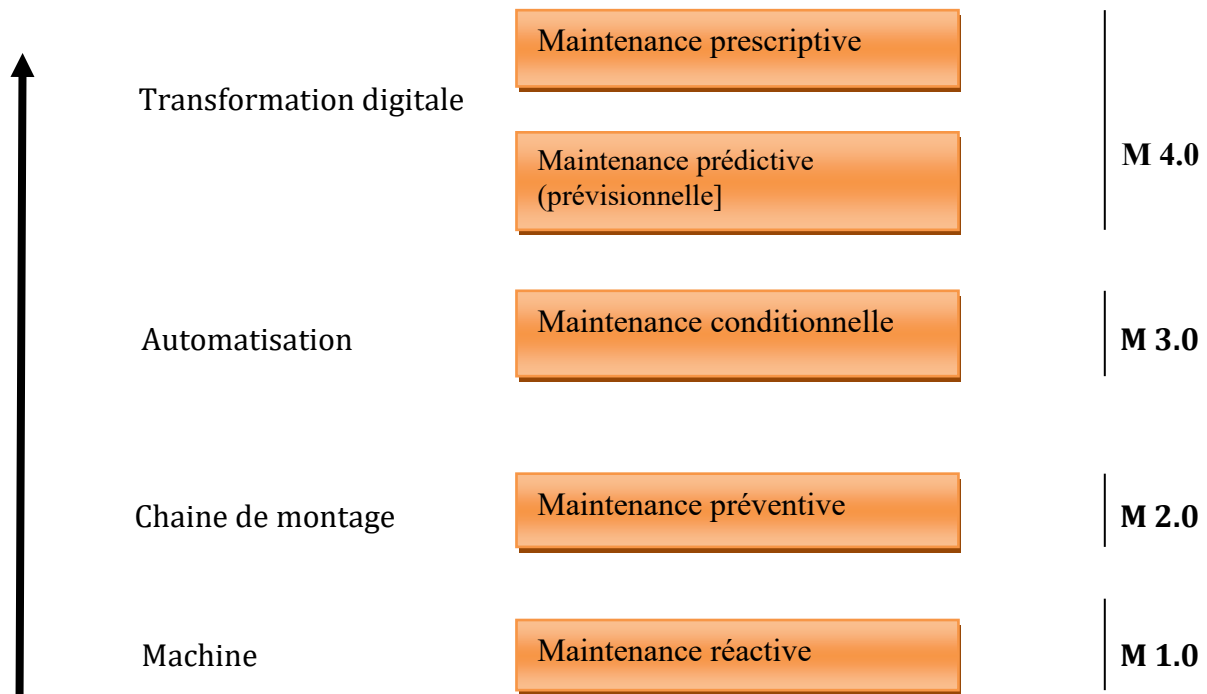


Figure 3.1 : Développement de la maintenance industrielle. [27]

1.4.2. Définition de la maintenance 4.0

La maintenance 4.0 utilise des technologies telles que l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle pour anticiper les défaillances, optimiser les opérations et augmenter la durabilité des équipements industriels.

La maintenance 4.0, également nommée « Smart Maintenance », adopte des technologies avancées telles que l'internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA) dans le but d'optimiser les opérations de maintenance des entreprises. En exploitant les données, la maintenance 4.0 améliore la performance des machines industrielles dans plusieurs secteurs.

La Maintenance 4.0 n'est pas simplement une tendance passagère, mais une révolution industrielle qui redéfinit les règles du jeu dans l'industrie de la maintenance. En intégrant des technologies de pointe et des analyses de données à la réalité de votre industrie, elle ouvre la voie à des opérations de maintenance plus intelligentes et plus efficaces. [2]

1.4.3. Caractéristiques de la maintenance 4.0

La maintenance 4.0 se caractérise par l'utilisation de technologies numériques pour optimiser la gestion des équipements industriels et améliorer leur fiabilité. Elle utilise comme cité précédemment, des données collectées par l'Internet des Objets (IoT) et l'analyse de ces données via l'intelligence artificielle (IA) pour anticiper les défaillances et prendre des décisions éclairées.

Voici les principales caractéristiques de la maintenance 4.0 :

- **Utilisation de l'IoT**

Les équipements industriels sont équipés de capteurs qui collectent des données sur leur état de fonctionnement (vibrations, températures, pression, etc.) et les transmettent à un système central.

- **Analyse des données via l'IA**

Ces données sont analysées en temps réel par des algorithmes d'IA pour détecter les anomalies, prédire les défaillances et optimiser la maintenance.

- **Maintenance prédictive (prévisionnelle)**

La maintenance 4.0 permet de prévoir les défaillances avant qu'elles ne se produisent, permettant ainsi d'intervenir à temps pour les réparer.

- **Gestion optimisée des actifs**

La maintenance 4.0 permet de mieux gérer les actifs industriels, de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la performance des équipements.

- **Réduction des temps d'arrêt**

Grâce à la maintenance prédictive, les temps d'arrêt des machines sont réduits, ce qui permet d'améliorer la productivité et la compétitivité des entreprises.

- **Amélioration de la sécurité**

La maintenance 4.0 permet de mieux détecter les risques de sécurité et de prendre des mesures préventives pour éviter les accidents.

- **Utilisation de la réalité augmentée**

La réalité augmentée permet aux techniciens de visualiser des instructions ou des informations sur l'équipement en temps réel, ce qui facilite les interventions de maintenance.

- **Intégration de la GMAO**

La maintenance 4.0 s'intègre généralement avec les systèmes de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) pour faciliter la gestion des interventions.

- **Décloisonnement des systèmes d'information**

La maintenance 4.0 permet de croiser les données provenant de différents systèmes d'information pour obtenir une vision plus globale de l'état des équipements et de leur impact sur la production. [21][19]

Conclusion

L'organisation et la structuration de la maintenance se sont fondées sur des concepts et des méthodes radicalement en rupture avec les usages traditionnels de l'entretien du passé.

En passant par différentes formes et types de maintenance, nous assistons aujourd'hui à l'émergence de la maintenance 4.0.

Chapitre 2 :
Entreprise
et culture numérique

Introduction

Le numérique modifie notre regard sur notre héritage, sur ce qui nous entoure et sur la façon dont nous envisageons notre futur. Il introduit des moyens de production nouveaux, des objets technologiques sans cesse renouvelés, de nouvelles pratiques sociales et cela dans les domaines économiques, social et artistique. Il change notre rapport aux objets, à l'information, aux savoirs et à l'enseignement, notre perception de l'espace et du temps. Il bouscule nos relations interpersonnelles, nos identités, mais aussi nos valeurs et nos représentations.

L'irruption des technologies dans notre quotidien et la numérisation de nos activités et de nos productions a transformé nos comportements, nos pratiques, nos habitudes et fait émerger une culture numérique devenue un élément constitutif de notre identité contemporaine.

Cette culture numérique révolutionne les organisations et remet en cause des modèles économiques et des modes de management. [5]

2.1. Définition de l'entreprise

Une entreprise est un groupement humain hiérarchisé qui met en œuvre des moyens intellectuels, physiques et financiers pour produire, former, distribuer les richesses conformément à des buts définis pour réaliser un profit. En plus de réaliser un profit, l'entreprise a pour objectif de répondre aux questions fondamentales importantes de l'économie : - Que produire ?

Quels sont les besoins du marché afin de les satisfaire ?

- Pour qui produire ?

Quelle est la catégorie des consommateurs ayant exprimé le besoin ?

- Comment produire ?

Quelles matières employer, quelles techniques, quels investissements, quelles personnes. ?

On peut dire que l'entreprise est une unité de production de biens et de services. ...Mais c'est aussi une unité de répartition des richesses.

Pour fabriquer des biens et des services, l'entreprise doit combiner différents facteurs de production.

Le but de l'entreprise est d'atteindre l'efficacité maximale afin de minimiser les coûts et

de réaliser des profits. Pour cela elle recherche la meilleure combinaison possible des facteurs de production. [5]

2.2. Définition de la culture numérique

L'expression culture numérique, culture digitale, culture internet, culture web, cyberculture ou e-culture fait référence aux nouvelles habitudes culturelles produites par le développement et la diffusion des nouvelles technologies numériques et en particulier d'Internet et du web.

« Ensemble des techniques matérielles et intellectuelles, des pratiques, des modes de pensée et des valeurs qui se développent sur Internet », la culture numérique témoigne de l'utilisation de l'informatique dans tous les domaines de l'activité humaine.

La culture numérique renvoie d'abord à toute forme de production originale d'une œuvre culturelle à l'aide des technologies numériques, et en particulier des technologies de l'information et de la communication. Elle se réfère également aux relations entre producteurs et publics des œuvres culturelles, ces relations étant profondément bouleversées par les technologies numériques.

2.3. Caractéristiques de la culture numérique

La culture numérique est une promesse de création de valeur. En effet, elle permet la mise en place et le succès de nouveaux modèles d'affaires, elle est synonyme de partage de connaissances, d'intelligence collective et donc de création de valeur.

Elle est une chance pour inscrire l'entreprise dans un développement et une performance durables qui prennent en compte la valeur économique, sociale et environnementale.

La culture numérique, partagée par les parties prenantes, pose les conditions de réussite de la transformation numérique de l'entreprise dans son écosystème.

Cette culture numérique se caractérise par la confiance, valeur centrale dans un monde complexe et mouvant, par de nouveaux modes de management fondés sur les échanges horizontaux et la production de liens, la reconnaissance par les pairs, basée sur la compétence plutôt que sur le rang hiérarchique, un respect du droit à l'erreur, une valorisation/ des individus et une forme de cohésion dans le travail. La confiance est une valeur première à favoriser dans toutes les interactions au sein de l'entreprise et avec les parties prenantes.

Dans le contexte de l'entreprise numérique, où de nombreuses activités s'effectuent en réseau, avec de nombreuses interactions indirectes et à des rythmes accélérés, la confiance apparaît comme un facteur essentiel du succès d'une équipe. La confiance est tout aussi importante que les objectifs assignés à l'équipe, car elle est le lien affectif et spontané permettant d'en connecter tous les membres. Elle constitue un mécanisme efficace pour créer des changes directs, opérationnels et pour améliorer la cohésion de l'équipe. [5]

2.4. Vecteurs d'innovation et de coordination

La coordination peut être considérée comme un concept global regroupant les notions d'intégration (prendre part à un ensemble plus vaste de collaboration) (travailler ensemble) et de coopération (effectuer des opérations en commun).

Une coordination efficace favorise la prise de décision. Elle contribue à la performance de l'entreprise, à la réalisation d'économies, ou encore à la flexibilité face aux changements du marché. Le partage d'informations à travers les nouvelles technologies est au cœur de la coordination des activités métiers, notamment à travers les systèmes de bureaux mobiles.

L'usage des technologies numériques et l'innovation de coordination, notamment celles de la mobilité, est considéré comme un des mécanismes de coordination les plus influents dans l'entreprise. Dans des environnements fortement complexes et changeants, un usage efficace des outils de traitement de l'information est un facteur clé de succès pour la coordination.

Enfin, l'adoption d'une nouvelle technologie constitue un processus très dynamique, qui introduit du changement dans les pratiques, la structure et la stratégie des organisations. De la même façon, quand une technologie est adoptée par une organisation, sa conception, ses composants et son usage sont eux aussi choisis et adaptés par l'organisation.

2.5. Industrie et entreprise du futur

2.5.1. Définitions

2.5.1.1. Industrie du futur

L'industrie du Futur, aussi appelée Industrie 4.0, désigne un ensemble de transformations des systèmes de production, notamment grâce à l'intégration de nouvelles technologies numériques, visant à améliorer la compétitivité, la flexibilité et la durabilité des entreprises. Cette révolution industrielle se caractérise par la convergence du monde virtuel et du monde réel, avec des technologies comme l'intelligence artificielle, l'internet des objets, la robotique et la fabrication additive. En résumé, l'industrie du futur est une transformation profonde de l'industrie, portée par les nouvelles technologies, qui permet de mieux répondre aux besoins des clients, de réduire les coûts et d'améliorer la performance globale des entreprises [50][45]

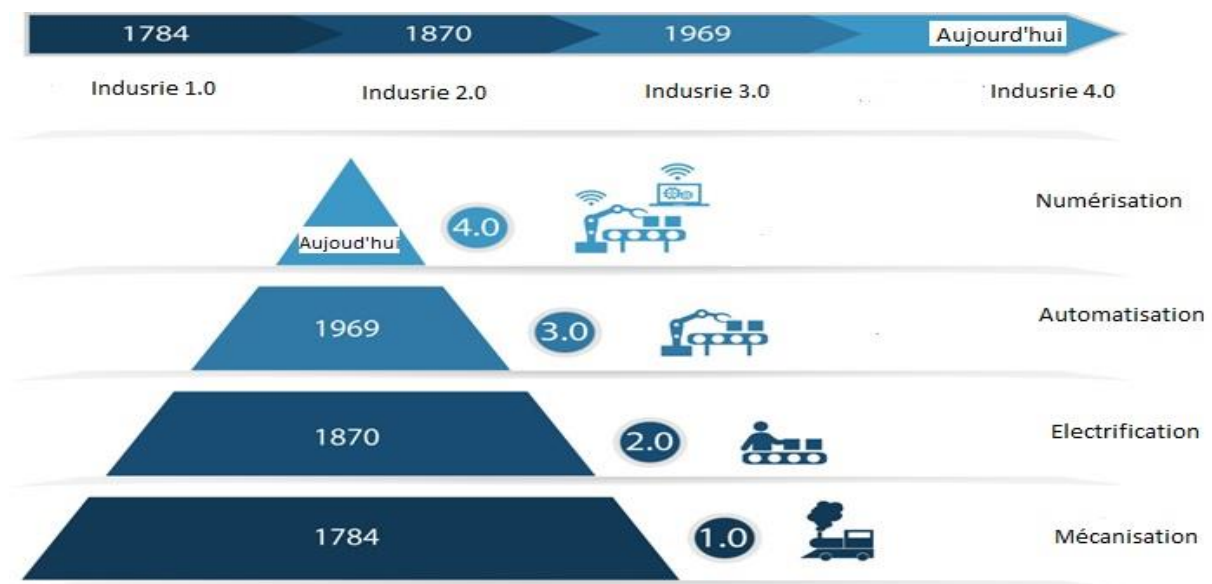


Figure 4.2 : Développement de l'industrie 4.0 [46]

2.5.1.2. Entreprise du futur

L'entreprise du futur est un concept qui désigne une organisation capable de s'adapter rapidement aux évolutions technologiques, économiques et sociales. Elle intègre des stratégies innovantes qui favorisent la flexibilité, la durabilité et la collaboration au sein de son écosystème.

Les entreprises du Futur se distinguent par plusieurs caractéristiques majeures : elles sont centrées sur le client, valorisent la diversité et l'inclusion, utilisent des données pour éclairer leurs décisions et mettent en avant des pratiques de travail collaboratives. Elles embrassent aussi l'innovation continue et favorisent une culture d'apprentissage constant. [50]



Figure 5.2 : Entreprise du futur [52]

Conclusion

Dans le cadre de l'industrie du futur, la culture numérique transforme profondément le fonctionnement des entreprises. Elle ne se limite pas à l'adoption de technologies, mais implique une nouvelle manière de penser, de collaborer, et d'innover. Dans un environnement en constante évolution, les entreprises doivent intégrer cette culture pour rester compétitives, attirer les talents, et répondre aux attentes d'une clientèle toujours plus connectée.

La réussite passe par une adaptation continue, une formation des collaborateurs et une ouverture aux nouveaux usages numériques. Ainsi, la culture numérique devient un levier stratégique incontournable pour construire l'entreprise de demain et contribuer à la mise en œuvre de la maintenance 4.0.

Chapitre 3 :
Briques technologiques
de l'industrie 4.0

Introduction

L'industrie 4.0, souvent appelée la quatrième révolution industrielle, marque une transformation profonde des systèmes de production grâce à l'intégration des technologies numériques. Au cœur de cette évolution se trouvent les briques technologiques qui forment la base de cette nouvelle ère industrielle. Parmi elles, on retrouve l'Internet des objets, l'intelligence artificielle, la robotique avancée, la réalité augmentée, l'impression 3D ou encore le Big Data.

Ces technologies permettent d'optimiser les processus, d'améliorer la flexibilité des lignes de production et de créer des usines intelligentes. Comprendre ces briques technologiques est essentiel pour appréhender les enjeux et les opportunités de l'industrie du futur.

3.1. Définition et caractéristiques du Big Data.

3.1.1. Définition du Big Data

Le terme anglo-saxon « Big Data » est difficile à traduire et n'a pas d'équivalent en français. L'expression « données massives » est aussi relativement utilisée, mais aucune traduction officielle n'a été adoptée.

Il est difficile de définir le Big Data en quelques mots, pour bien comprendre ce qu'est le Big Data, il est intéressant de connaître son histoire.

Le mouvement Big Data a été amorcé il y a une quinzaine d'années avec l'émergence de données trop volumineuses pour être manipulées à l'aide de techniques traditionnelles telles que les bases de données relationnelles et les requêtes SQL. Les entreprises de moteurs de recherche ont été les premières à être confrontées à d'importants volumes de données pas forcément structurés. Face à ces difficultés, Google créa en 2001 une base de données compressées intitulée Big table ainsi que l'algorithme MapReduce. Google publia alors ces éléments en 2004.

Suite à cette publication, Doug Cutting, un américain diplômé de Stanford réalise le potentiel de cette technologie et lança le prototype open source Hadoop. Grâce à son modèle de programmation et à son système de fichiers hautement distribués, Hadoop est capable de gérer de gigantesques quantités de données non structurées. Doug Cutting rejoignit alors la société Yahoo pour stabiliser Hadoop, technologie faisant aujourd'hui référence dans l'univers du Big Data. Cutting a ensuite rejoint la société

Cloudera spécialisée dans l'enrichissement de Hadoop. Yahoo a fondé de son côté la société HortonWorks, une filiale dédiée au big data qui contribue également au développement de Hadoop. Cloudera et HortonWorks se disputent actuellement le titre du plus gros contributeur d'Hadoop.

Bien que la problématique de données volumineuses ait été rencontrée dès le début des années 2000, le terme Big Data n'apparaît que mi-2010 sur le web.

Une recherche du terme Big Data sur le site « Google Trends » montre que depuis 2010, le nombre de recherches sur ce thème ne fait que croître, en guise de définition, on peut donc établir que le Big Data s'adresse aux énormes volumes de données structurées ou non structurées, difficilement gérables avec des solutions classiques de stockage et de traitement. [4]

Ces données proviennent de sources diverses et sont produites en temps réel.

Le Big Data est le point de rencontre entre :

- la multiplication des données non structurées.
- les besoins d'analyse de ces données.
- les progrès de la technologie.[4]

3.1.2 Caractéristiques du Big Data

Les caractéristiques des mégadonnées généralement définies sont les suivantes :

- elles ne sont pas toujours organisées sous forme de tables et leurs structures peuvent varier.
- elles sont produites en temps réel.
- elles arrivent mondialement en flots continus.
- elles peuvent être métataguées mais de façon disparaire (localisation, heures, jours, etc.).
- Elles proviennent de sources très disparates (Smartphones, capteurs, téléviseurs connectés, tablettes, PC fixes, PC portables, objets, machines), de façon désordonnée et non prédictible.

Une autre caractérisation du Big Data est celle des 3V : Volume, Variété et Vélocité.

Ce résumé en 3V semble faire l'unanimité auprès des différents analystes qui se penchent sur le phénomène Big Data :

- Le premier V s'intéresse au volume des données à traiter, le volume de données nées et enregistrées des progressions impressionnantes et préoccupantes.

- Le second V fait référence à la variété des sources : ordinateurs, tablettes, smartphones, capteurs, puces RFID, GPS, caméras, sites, blogs, réseaux sociaux, etc. Beaucoup de ces données ne sont pas structurées, et sont donc difficilement stockables et analysables avec des outils classiques (SGBD, entrepôts de données).

- Le troisième V concerne la vitesse, c'est à dire la vitesse de prise en compte des informations générées. L'objectif est de pouvoir intégrer quasiment instantanément les événements de façon à réagir le plus vite possible, par exemple pour exploiter en temps réel les réponses au contexte des clients. [4]

3.2. Cloud computing

- Modèle établi d'industrialisation et de commercialisation de l'informatique.
- Dans le cloud, le fournisseur met à disposition de l'entreprise des ressources informatiques (des applications par exemple).

3.3. Robotique et cobotique



Figure 6.3 : Cobotique [47]

- 500000 robots dans le monde.
- Cabots (robots collaboratifs) interviennent tels des assistants, des opérateurs.
- Travaillent avec les humains tout en étant autonomes.

3.4. Jumeaux numériques



Figure 7.3 : Jumeaux numériques [47]

- Répliques virtuelles de machines, des lignes de production ou d'usines.
- Utilisation des données en temps réel pour simulation.
- Capture de données opérationnelles environnementales d'objets connectés à internet à partir des données de capteurs IOT.
- Réduction des temps d'arrêt et les besoins en maintenance.[19][46]

Conclusion

Les briques technologiques de l'industrie 4.0 représentent les fondations de l'usine du futur. En combinant les technologies telles que l'IoT, l'intelligence artificielle, le Big Data, la robotique ou encore la réalité augmentée, les entreprises industrielles peuvent gagner en efficacité, en flexibilité et en réactivité. Ces outils permettent une production plus intelligente, plus personnalisée et plus durable. Cependant, leur mise en œuvre nécessite une transformation organisationnelle, des compétences adaptées et une vision stratégique. Ainsi, maîtriser ces briques technologiques est un enjeu clé pour assurer la compétitivité et l'innovation dans l'industrie du XXI^e siècle.

Chapitre 4 :
Piliers et technologies utilisées
dans la maintenance4.0

Introduction

La maintenance 4.0 repose sur l'intégration des technologies numériques avancées pour améliorer la prévisibilité, la fiabilité et l'efficacité des opérations de maintenance.

Contrairement aux approches traditionnelles, qui réagissent aux pannes ou s'appuient sur des calendriers fixes, la maintenance 4.0 vise une démarche proactive et intelligente, en exploitant les données en temps réel et les capacités d'analyse avancées.

Cette transformation s'appuie sur plusieurs piliers fondamentaux, notamment l'Internet des objets industriels (IIoT), l'intelligence artificielle, la réalité augmentée.

Ces technologies permettent de mettre en œuvre des stratégies comme la maintenance prédictive (prévisionnelle), la surveillance à distance ou encore la maintenance assistée par des jumeaux numériques. Elles offrent aux industriels une meilleure maîtrise des équipements, une réduction significative des coûts d'arrêt, et une optimisation globale de la performance.

Donc, il est essentiel de comprendre les piliers de la maintenance 4.0 ainsi que les technologies sur lesquelles elle s'appuie pour révolutionner les pratiques de maintenance dans les industries modernes.

4.1. Principaux piliers de la maintenance 4.0

4.1.1. 1^{er} pilier : le premier pilier regroupe l'ensemble des moyens permettant la circulation des données entre les systèmes. A cette fin, il faut :

- une diffusion automatique des informations et une interconnexion des systèmes communicants.
- une mise à disposition des données entre les systèmes.

4.1.2. 2^{ème} pilier : interconnexion des logiciels métier sur des réseaux variés (réseaux industriels, réseau de l'entreprise, internet) implique la collaboration entre l'IT et l'informatique industrielle.

4.1.3. 3^{ème} pilier : pilier essentiel de la maintenance 4.0 et plus généralement de la digitalisation de l'entreprise pour la mise en œuvre d'une organisation décloisonnée où les pratiques des différents métiers sont pensées en cohérence les unes des autres.

Exemple, interconnecter la GMAO et l'outil de planification ou d'ordonnancement organise la remontée de la planification d'une opération de maintenance dans

la planification de la production afin de permettre un travail concentré entre la production et la maintenance. [30],[31]

4.2. Intelligence Artificielle (IA)

Définition 1

« La tentative nouvelle et passionnante d'amener les ordinateurs à penser... d'en faire des machines dotées d'un esprit au sens le plus littéral. »

« L'automatisation d'activités que nous associons à la pensée humaine, des activités telles que la prise de décision, la résolution de problèmes, l'apprentissage... »

Définition 2

« L'étude des facultés mentales grâce à des modèles informatiques »

« L'étude des moyens informatiques qui rendent possibles la perception, le raisonnement et l'action. »

Définition 3

« L'art de créer des machines capables de prendre en charge des fonctions exigeant de l'intelligence quand elles sont réalisées par des gens. »

« L'étude des moyens à mettre en œuvre pour faire en sorte que des ordinateurs accomplissent des choses pour lesquelles il est préférable de recourir à des personnes pour le moment. »

Définition 4

« L'intelligence artificielle (Computational intelligence) est l'étude de la conception d'agents intelligents. »

« L'IA... étude le comportement intelligent dans des artefacts. » [25]

L'intelligence artificielle est une branche de l'informatique qui permet aux systèmes d'apprendre et d'exécuter des tâches normalement associées à l'intelligence humaine, telles que la reconnaissance vocale, la prise de décisions ou la perception visuelle.

Dans les années 50, la réalité de l'intelligence artificielle était au mieux hors de portée : les ordinateurs ne pouvaient pas stocker ou exécuter des informations, et les coûts qui y étaient relatifs étaient astronomiques.

Entre les années 50 et 70, l'industrie informatique a pu s'appuyer sur des ordinateurs plus rapides, plus accessibles et moins coûteux

Dans les années 80, deux techniques importantes ont été développées. La première, le

deep Learning, ou « apprentissage en profondeur »>, a permis aux ordinateurs d'apprendre par l'expérience. Le second, l'expert system, ou « système expert », imite la capacité de l'homme à prendre des décisions. Les ordinateurs ont commencé à utiliser un raisonnement basé sur des règles en recourant principalement à une structure « si-alors mise en œuvre pour répondre à des questions.

En 1997, Dragon Systems a développé et implémenté une solution de reconnaissance vocale sous Windows. Les années 2000 ont été synonymes de débit et d'options de stockage, comme icloud, catapultant l'utilisation des ordinateurs auprès du grand public et contribuant à placer l'IA sous les feux de la rampe. Aujourd'hui, IA est sur une voie express, en raison de trois améliorations sectorielles majeures.

- **Le Big Data** : les algorithmes utilisés par l'IA sont essentiellement « formés » par la grande quantité d'informations présentes dans le Big Data. Ces algorithmes aident ensuite l'IA à traiter ces informations à un rythme incroyable et à rendre les données accessibles et plus utilisables.

- **Les algorithmes** : les algorithmes permettent l'automatisation de tâches que l'on croyait autrefois uniquement possibles grâce à l'intelligence humaine. [32]

4.3. Internet des Objets (IOT)

La notion est plus ou moins simple : l'IoT représente des objets connectés à Internet qui peuvent 'communiquer' entre eux. Cette communication est décrite comme le M2M (Machine to Machine).

'Communiquer' peut d'ailleurs sembler un grand mot, mais tout comme le Web communique des informations d'un serveur à l'utilisateur final par le biais d'un écran, les objets connectés font de même. Pour donner un exemple concret, un technicien doit en temps normal sortir vérifier un certain nombre d'installations en personne pour y prendre des mesures et s'assurer que tout fonctionne.[32]

Avec l'IoT, nul besoin que le technicien sorte : chaque installation peut communiquer son état de "santé" en direct à un système centralisé, et le technicien peut plus rapidement établir un diagnostic, prenant des décisions basées sur cette analyse automatique.

Cet exemple ne couvre que les services de terrain, l'IoT sert déjà dans de nombreux domaines : la santé (vérifier l'état de bébés, de malades ou d'infirmes à domicile, des

Chapitre 4 : Piliers et technologies utilisées dans la maintenance4.0

rappels pour des médicaments prescrits, etc.), l'infrastructure urbaine (gestion de l'électricité, niveaux de pollution), la domotique (régler le chauffage, les lumières, la condition de vos plantes...), l'environnement (assurer un suivi de la faune), ou encore les industries (le contrôle qualité). Tout comme le Web 2.0 qui régit maintenant une grande partie de nos vies, l'IoT prend progressivement les devants, s'immiscant sous diverses formes dans la vie professionnelle et personnelle. Certains prédisent même que ce serait le début d'une nouvelle ère : le Web 3.0.

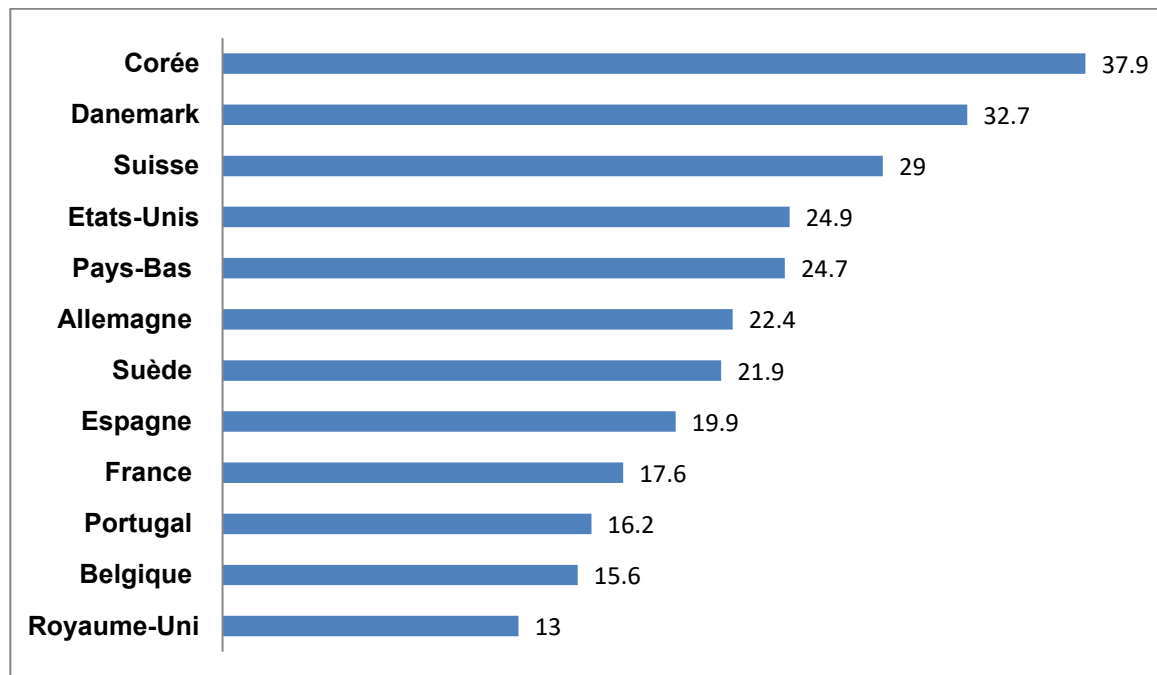


Figure 8.4 : Pays avec les plus d'appareils IoT [50]

(Données publiées en mars 2016)

4.4. Capteurs intelligents

Un capteur est un dispositif permettant de transformer une grandeur physique observée en une grandeur physique utilisable. Il sert à collecter toutes sortes d'informations terrain : tensions électriques, vibrations, températures, pressions, sons, consommation de lubrifiants ou d'électricité, etc. Le capteur traditionnel ne fait que collecter l'information qui est ensuite interprétée par un humain. Le capteur dit « intelligent » intègre des éléments de traitement numérique de la donnée, qui lui confère des capacités d'interprétation autonomes.

Les capteurs intelligents se composent ainsi de trois éléments : un ou plusieurs capteurs « classiques », un microprocesseur et une interface de communication. Ils sont par exemple capables d'identifier des signaux faibles annonçant un problème technique, de réaliser des autodiagnostic ou encore d'engager des actions en fonction de règles prédéfinies.

Les capteurs intelligents gagnent également en polyvalence. Par exemple, des capteurs intelligents peuvent servir au contrôle de conformité, mais aussi aux mesures sans contact, à l'identification et au tri, ou encore à la lecture et la vérification de marquages. Dernière spécificité du capteur intelligent : il peut être configuré à distance, grâce à ses capacités de communications bidirectionnelles. [33]



Figure 9.4 : capteurs intelligents [50]

4.5. Apprentissage automatique

L'apprentissage automatique (*machine learning* en anglais) est un champ d'étude de l'intelligence artificielle qui vise à donner aux machines la capacité d'apprendre à partir de données, via des modèles mathématiques. Plus précisément, il s'agit du procédé par lequel les informations pertinentes sont tirées d'un ensemble de données d'entraînement.

Le but de cette phase est l'obtention des paramètres d'un modèle qui atteindront les meilleures performances, notamment lors de la réalisation de la tâche attribuée au modèle. Une fois l'apprentissage réalisé, le modèle pourra ensuite être déployé en production. [33]

4.6. Réalité augmentée

La Réalité Augmentée (ou RA) est une technologie qui permet d'intégrer des éléments virtuels en 3D (en temps réel) au sein d'un environnement réel. Le principe est de combiner le virtuel et le réel et donner l'illusion d'une intégration parfaite à l'utilisateur. Dans l'industrie, la réalité augmentée devient un excellent moyen de promouvoir un projet, usine, chaîne de production, produits. Celle-ci répond à une problématique bien connue des industriels : montrer ce qui est difficile, voire impossible de déplacer comme les chaînes de production ou les machines agricoles lors des salons, par exemple. Intégré dans une application mobile, il est possible de faire une démonstration de son fonctionnement de manière très fidèle. Les flux ou les parties mobiles sont animées (bras articulés, engrenages, personnages, etc.) et permettent d'aisément comprendre le fonctionnement d'une machine ou d'un objet présenté. On peut également y ajouter des parties interactives, permettant d'accéder à des éléments supplémentaires de compréhension : fiches informatives, éléments zoomés, vidéos. [34]

4.7. Tablettes numériques / Smartphones

Une tablette numérique, appelée également tablette tactile, tablette électronique, ardoise électronique ou tout simplement tablette, est un ordinateur portable ultra plat qui se présente sous la forme d'un écran tactile sans clavier, et qui offre à peu près les mêmes fonctionnalités qu'un ordinateur classique.

La première tablette tactile grand public, l'iPad 1, est apparue sur le marché en 2010. Depuis, de nombreuses autres tablettes sont apparues sur le marché. Elles se distinguent essentiellement par leur prix, leurs composants (stockage, processeur, capteur photo, écran tactile), la qualité de leur finition, le système d'exploitation embarqué (interface qui sert à faire fonctionner la machine) et donc les applications compatibles.

La tablette permet d'accéder à des contenus multimédias tels que la télévision, la navigation sur le web, la consultation et l'envoi de courriers électroniques, l'agenda, le calendrier et la bureautique simple. C'est en quelque sorte un intermédiaire entre l'ordinateur portable et le Smartphone.

L'écran tactile remplace la souris. Un logiciel interprète le contact et le déplacement des doigts sur l'écran. Selon la marque et le modèle de la tablette l'écran est plus ou moins précis et réactif. L'affichage à l'écran peut se faire en mode portrait ou paysage en pivotant la tablette. [35]

4.8. Utilisation de la maintenance prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle est une maintenance préventive conditionnelle effectuée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. Plus précisément, elle se base sur l'anticipation du franchissement de seuils prédéfinis par le(s) paramètre(s) surveillés. La modélisation de l'évolution de ce(s) paramètre(s) peut permettre d'évaluer le temps restant avant la panne, c'est-à-dire le temps restant avant le franchissement de ces seuils, également appelé RUL (Remaining Useful Life) en anglais. Cette prévision va permettre aux équipes de maintenance d'intervenir efficacement avant la défaillance et de façon programmée. La mise en œuvre d'une solution de maintenance prévisionnelle est complexe. En effet, elle nécessite de disposer d'un grand nombre de données (données de fonctionnement et de défaillance de l'équipement), et/ou d'une modélisation physique fiable des modes de défaillances de l'équipement. Par conséquent, les cas d'usage de la maintenance prévisionnelle sont peu courants. [36]

4.9 Impression 3D

L'impression 3D ou fabrication additive regroupe les procédés de fabrication permettant de créer des pièces en volume par ajout de matière en couches successives. Elle s'oppose à la fabrication soustractive. Cette famille de procédés a commencé à se développer au

début des années 1980 avec pour objectif principal de faciliter le prototypage rapide, puisque le coût de production est pratiquement indépendant de la quantité produite.

Les applications de l'impression 3D sont multiples. D'abord cantonnée au prototypage et aux visualisations pour l'architecture ou les études de design, elle se développe ensuite dans le domaine de l'appareillage et la prothèse. Les évolutions technologiques successives en ont fait une technologie plus mature qui est aujourd'hui utilisée dans des domaines aussi variés que l'industrie, l'aéronautique, la construction, l'armée, la bioimpression, la pharmacie... [36]

De nos jours, l'impression de plusieurs matériaux est possible, selon le procédé utilisé. Les matériaux utilisés sont : le plastique, la cire, le métal, le plâtre de Paris, les céramiques, le verre et même du béton.

Malgré les avancées majeures des années 2010, l'impression 3D domestique reste encore un hobby. S'il est désormais possible d'acquérir une imprimante 3D pour quelques centaines d'euros, celles-ci demandent encore une attention particulière et nécessitent une formation pour utilisation. [8]



Figure 10.4 : Imprimante 3D [41]

4.10. Appui sur la TPM et la GMAO

Les temps de marche, collectés via les automatismes, peuvent être enregistrés dans un outil de suivi de performance machines, comme une plateforme TPM qui les catégorisera.

Ainsi, les informations telles que les pannes mécaniques, les bourrages matières, etc. intéresseront la maintenance pour adapter sa stratégie de réglages et d'entretiens tandis que les informations sur des problèmes de flux et d'organisation seront utiles à la production pour améliorer son organisation.

On peut envisager que les analyses automatiques de la plateforme TPM, remontées dans la gestion de la maintenance assistée par ordinateur déclenche des opérations de maintenance sur détection de dépassement d'une occurrence de défaut. Par exemple, on rentre alors dans une démarche de maintenance prédictive, aussi appelée maintenance prévisionnelle, au sens où elle permet de prévoir les pannes.

4.10.1. Alignement de la TPM

- s'aligne sur les principes de l'industrie 4.0.
- favorise l'interconnexion des systèmes de production.
- réduit les temps d'arrêt et meilleure gestion des équipements.
- la TPM se tourne vers une approche prévisionnelle et anticipe les pannes grâce aux capteurs.
- les analyses automatiques de la plateforme TPM, remontées dans la GMAO, déclenchent des opérations sur détection de dépassement d'une occurrence de défaut. [19]



Figure 11.4 : Les 8 Piliers du TPM [42]

4.10.2. Implication de la GMAO

La GMAO s'inscrit pleinement dans une démarche d'industrie future :

- connectivité avec les systèmes informatiques de l'usine
- digitalisation des données issues de l'état de la machine.
- historique des interventions- traçabilité
- Cartographie de l'usine
- fuel-web
- Planète d'outils complémentaires dans le domaine du décisionnel. [19]

Conclusion

En s'appuyant sur des piliers technologiques solides tels que l'Internet des objets, l'intelligence artificielle, les systèmes de gestion de données, la réalité augmentée et la cybersécurité, la maintenance 4.0 transforme les méthodes classiques de maintenance en approches intelligentes, connectées et prédictives.

Ces innovations permettent non seulement de réduire les temps d'arrêt et les coûts de maintenance, mais aussi d'améliorer la sécurité, la traçabilité et la durabilité des systèmes industriels. La réussite de cette transition repose toutefois sur une intégration cohérente des technologies, une montée en compétences des équipes, et une culture d'entreprise tournée vers la digitalisation.

Ainsi, la maintenance 4.0 n'est pas simplement une évolution technique, mais un levier majeur de compétitivité et de performance pour l'industrie du futur.

Chapitre 5 :
Normalisation
et cybersécurité

Introduction

La multiplication des équipements connectés dans l'usine du futur expose les systèmes de maintenance à des risques de cyberattaques accrus. La cybersécurité désigne l'ensemble des technologies, processus et pratiques conçus pour protéger les réseaux, les dispositifs, les programmes et les informations contre tout accès non autorisé.

La cybersécurité est importante, car les gouvernements et les organisations recueillent, traitent, conservent et envoient des informations. Une grande partie de ces informations sont confidentielles, et un accès ou une exposition non autorisée peut avoir des conséquences négatives.

Le défi le plus difficile à relever en matière de cybersécurité est la rapidité avec laquelle les risques de sécurité évoluent.

De même, des normes de sécurité spécifiques, définissent les exigences pour protéger les infrastructures industrielles critiques

5.1. Contribution des normes

Les normes définissent des exigences de qualité et des exigences minimales et fournissent des solutions reconnues pour la protection des consommateurs ainsi que pour la santé, la sécurité et l'environnement. Le respect de normes de qualité et de sécurité permet de réduire de manière significative le risque d'accidents, en apportant une contribution importante à la protection de la santé des consommateurs et des employés.

- Quelques normes importantes

- Norme ISO 27001 Cybersécurité.
- SN EN ISO/IEC 2700 ; 2017 Procédures de sécurité.
- IEC PAS 63088 ; 2017 Fabrication intelligente.
- ISO/IEC 21823 - Série de normes.
 - Internet des objets (IoT).
 - Interopérabilité des systèmes IoT.
- ISO/IEC 30161 ; 2020 - Internet des objets (IoT), Exigence relative à la plateforme d'échange de données IoT pour divers services IoT.
- OPC UA (IEC 62541) – Norme d'interopérabilité, idéale pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0 et de l'internet des objets.

- 2014 – AFNOR – Identification, thématiques stratégiques liées à l’entreprise du futur.
- 2016 – Achèvement de l’enquête, mise en avant de 9 thématiques :
 - essais non destructifs.
 - normalisation de l’interopérabilité des logiciels, le traitement de l’image, la fiabilité de l’internet, la sécurité des systèmes d’information.
 - fabrication additive (3D).
 - robots industriels et collaboratifs, réalité augmentée.
 - efficacité énergétique et empreinte environnementale des entreprises.
 - utilisation des matériaux composites.
 - économie circulaire.
 - organisation, ordonnancement et logistique.
 - place de l’homme dans l’entreprise du futur.

Les normes permettent d’augmenter l’efficacité et de réaliser des économies, de manière transversale dans tous les domaines de l’entreprise, construction, achats, fabrication, technique de la qualité et des systèmes. Les normes contribuent à une production plus rationnelle et économique et répondent ainsi à l’exigence des consommateurs de bénéficier de prestations avantageuses sans renoncer à la qualité.[37]

- **Solutions de cybersécurité avancées**
La mise en place de solution de cybersécurité avancées, telles que le chiffrement des données et l’authentification renforcée, est primordial.
- **Réglementations et formation du personnel**
Le respect des réglementations en vigueur et la formation du personnel sont essentiels pour garantir la sécurité des informations sensibles liées à la maintenance. [19]

5.2. Norme d’interopérabilité

En informatique, l’interopérabilité est la capacité pour plusieurs systèmes informatiques à fonctionner ensemble. En général, il faut que les développeurs fixent des standards et des normes clairement établies et univoques pour que deux systèmes informatiques puissent fonctionner ensemble sans problème.

L'interopérabilité est la capacité à faire communiquer deux logiciels différents, issus d'équipes de développement différentes. Pour que les deux logiciels puissent communiquer, il faut que chacun suive exactement les mêmes règles, et c'est l'ensemble de ces règles qui font un protocole. Un protocole, c'est un ensemble de règles qu'il faut suivre si on veut communiquer. Certains services sur Internet bénéficient d'une bonne interopérabilité, le courrier électronique par exemple.

Sur Internet, on peut inventer son propre protocole, écrire les logiciels qui le parlent et les diffuser en espérant avoir du succès. Cette liberté d'innovation sans permission est donc une bonne chose mais elle a aussi des inconvénients. Si chaque développeur ou développeuse d'applications invente son propre protocole, il n'y aura plus de communication ou, plus précisément, il n'y aura plus d'interopérabilité.

Certaines normes sont développées de manière publique, tout le monde a accès aux informations. Lorsque la norme est développée par une organisation ouverte à tous et toutes, selon des procédures publiques, et que le résultat est publiquement disponible, on parle souvent de normes ouvertes. On peut citer l'exemple des normes ouvertes qui sont préférables pour l'interopérabilité. L'une des organisations de normalisation ouverte la plus connue est l'IETF (Internet Engineering Task Force, qui produit notamment la majorité des RFC). L'IETF a développé et gère la norme décrivant le protocole HTTP. [38]

5.3. Maîtrise des risques

La maîtrise des risques est le processus systématique de mise en œuvre de différentes mesures destinées à réduire la probabilité ou l'impact des risques auxquels une entreprise est confrontée au cours de ses activités. Il s'agit notamment des risques de sécurité, des risques financiers et des risques de publicité. Elle implique une planification et une exécution stratégiques afin d'atténuer les conséquences négatives et d'assurer le bon fonctionnement des processus et des projets. [37] ,[38]

5.4. Sécurité des données

La sécurisation de la gestion et de la protection des données doit devenir la partie émergée de l'iceberg en matière de confiance dans les interactions numériques des entreprises, avec toutes leurs parties prenantes. [5].

La sécurité des données utilise des outils et des technologies qui améliorent la visibilité des données d'une entreprise et la manière dont elles sont utilisées. Ces outils peuvent protéger les données par le biais de processus tels que le masquage des données, le cryptage et la rédaction d'informations sensibles.[40]



Figure 12.5 : Sécurité des données [42]

Conclusion

La cybersécurité est essentielle pour les organisations de toutes tailles. En utilisant les bons outils et en mettant en œuvre des programmes de formation et de sensibilisation des employés à la cybersécurité, on peut contribuer à protéger l'organisation contre les cybermenaces.

Cependant, la cybersécurité n'est pas un effort ponctuel, elle nécessite une maintenance permanente pour garantir que les systèmes restent sécurisés. On passe régulièrement en revue les politiques et procédures de sécurité pour s'assurer qu'elles sont à jour avec les meilleures pratiques actuelles, afin de garder une longueur d'avance sur les acteurs malveillants. Avec ces mesures en place, on peut être sûr que les données de l'entreprise resteront en sécurité.

Chapitre 6 :

Démarche de mise en œuvre progressive de la maintenance 4.0

Introduction

L'évolution rapide des technologies numériques a profondément transformé le monde industriel, donnant naissance à l'industrie 4.0.

Passer à la maintenance 4.0 ne se fait pas du jour au lendemain. Une démarche progressive est essentielle pour garantir une transition réussie, maîtrisée et adaptée aux spécificités de chaque entreprise. Elle implique à la fois une évolution technologique, organisationnelle et humaine, nécessitant une réflexion stratégique, une planification rigoureuse et un accompagnement du changement.

6.1. Digitalisation de la maintenance

Dans une démarche d'industrie 4.0, la maintenance doit aussi se digitaliser pour devenir maintenance 4.0.

Il est recommandé de débiter la digitalisation par la connexion de ses automatismes et de ses logiciels métiers (GMAO, Plateforme TPM,)

Cependant, un plan de maintenance doit être établi au préalable. [19]

6.1.1. Plan de maintenance avant digitalisation

Avant de digitaliser la maintenance, il est nécessaire de procéder à :

- l'identification des équipements et leurs références
- l'évolution de la criticité des équipements
- la définition des tâches de maintenance
- l'identification des ressources existantes
- la planification des interventions
- l'analyse des données en continue
- au suivi des interventions (traçabilité)
- à la collaboration entre les équipes. [7],[19]

6.1.2. Etapes

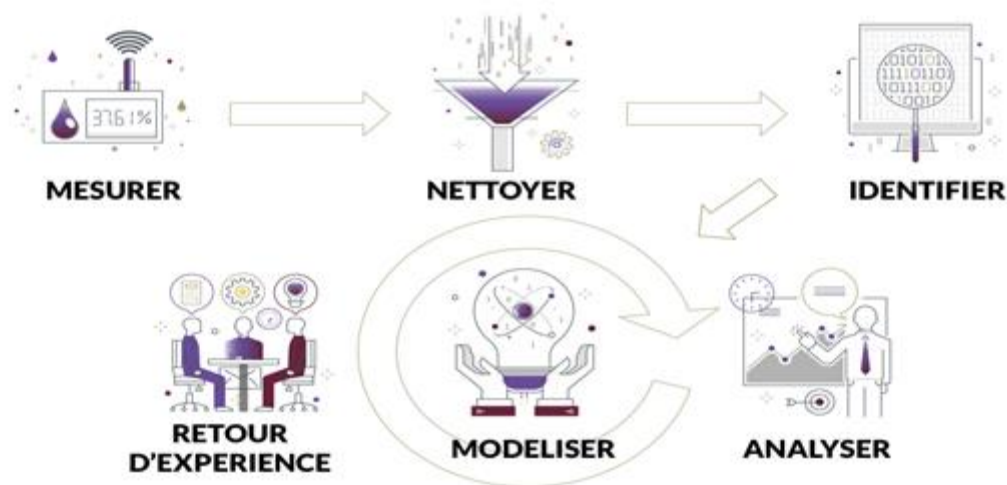
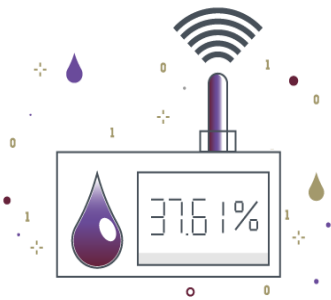


Figure 13.6 : 6 étapes vers un apprentissage progressif. [53]

Etape 1 : Mesurer les informations

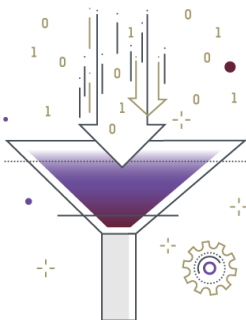


Afin de collecter des données de manière continue, il faudra équiper les installations de capteurs.

Ces derniers permettent de collecter en temps réel l'information, et de la transmettre aux serveurs.

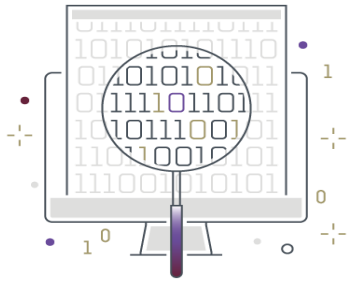
Le choix des capteurs dépendra naturellement du type d'installation.

Etape 2 : Nettoyer les données



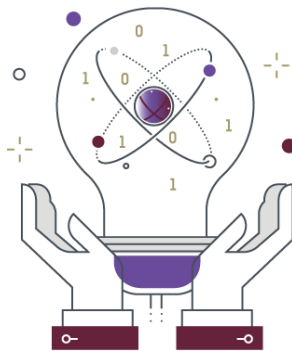
Les données brutes non transformées en sortie de capteur sont très rarement exploitables en l'état. De multiples raisons existent à cela : des éléments parasites biaisent les mesures de manière ponctuelle ou permanente, des doublons peuvent apparaître... Il est donc essentiel de filtrer et de trier les données pour qu'elles soient utilisables.

Etape 3 : Identifier les tendances



Une fois que les données sont nettoyées, il faut les analyser pour être en mesure de dégager des tendances vis à vis du comportement « normal » de l'installation ou des indices de la dégradation de ce fonctionnement. Les résultats de ces analyses permettront de poser les bases d'un modèle de maintenance prédictive pour cette installation.

Etape 4 : Modéliser le fonctionnement



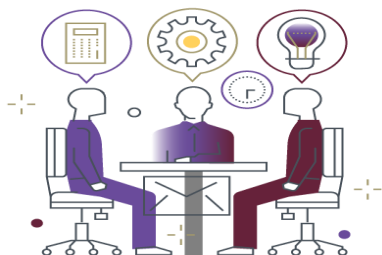
L'installation industrielle sera modélisée grâce à des algorithmes et des schémas de panne spécifiques. La dégradation des machines pourra donc être anticipée en détectant les signaux avant-coureurs de dysfonctionnements plus sévères. Les pannes bien réelles sur la machine et les arrêts de production pourront être ainsi évités.

Etape 5 : Analyser les résultats



La maintenance prédictive (prévisionnelle) se base sur l'exploitation des données historiques, il faut donc analyser régulièrement les résultats du modèle. Cette analyse permet de proposer des recommandations aux équipes de maintenance pour assurer une meilleure longévité du matériel.

Etape 6 : Améliorer grâce au retour d'expérience



Certaines pannes sont facilement décelables, d'autres plus complexes à déceler. Le retour d'expérience est la clé dans la démarche de la maintenance prédictive car il permet d'améliorer de manière continue le modèle. [42]

6.1.3. Conditions de réussite de la digitalisation

La réussite d'une transformation digitale passe inévitablement par une communication interne forte et efficiente. En effet, informer régulièrement les équipes des avancées et des objectifs permet de maintenir la motivation globale et d'éviter les résistances au changement. En outre, créer des espaces d'échange facilite l'émergence d'idées innovantes et offre la possibilité de partager les préoccupations, ce qui permet de les résoudre. [43]

6.2. Digitalisation de la documentation et des procédures

Digitaliser ou dématérialiser ses documents consiste à remplacer les documents au format papier de son organisation par des fichiers numériques, ou bien à les produire directement au format numérique via son système d'information (dématérialisation native). Elle vise également à stocker et conserver ses documents électroniques sur des ordinateurs ou des serveurs informatiques.

Un projet de digitalisation en entreprise est difficilement isolé car il vise à revoir l'ensemble de la chaîne de gestion et de conservation des documents. [11]

La dématérialisation peut donc concerner différents processus de traitements au sein des organisations et implique de les automatiser via la mise en place d'un logiciel de GED (Gestion Electronique des Documents). [43],[44]

6.3. Communication

La communication est le processus fondamental par lequel les individus et les entités échangent des informations. Ce processus peut impliquer une transmission de pensées, de messages, ou d'informations à travers divers moyens, incluant la parole, l'écriture, et les signaux non-verbaux, elle nécessite une stratégie intelligente et digitale avec des plateformes numériques et des supports digitaux (sites internet, réseaux sociaux, news letters...) [44]

6.3.1. Analyse éthique

Pour l'analyse éthique il faudrait veiller à :

- garantir la performance à long terme
- l'identification des risques dans l'industrie 4.0
- aux comportements moraux à respecter

- à l'éthique du devoir (déontologie)
- au comportement éthique (bien être de la société)
- à l'éthique de la vertu (qualités de la personne pour être heureuse)
- à la dépendance et impact indirect de l'éthique sur la performance [19],[21]

6.3.2. Echange des données

L'Echange de Données Informatisé, est la communication inter-entreprise de documents commerciaux dans un format standard. Pour faire simple, l'EDI est un format électronique normalisé qui remplace les documents papier tels que les bons de commande ou les factures.

Dans le cas des transactions EDI, les informations circulent directement d'une application informatique à une autre, d'une organisation à l'autre. Les normes EDI précisent où et dans quel ordre doivent apparaître les informations dans un document. Grâce à cette automatisation, le partage des données est plus rapide et plus simple que les méthodes traditionnelles sur papier, qui peuvent prendre des heures, voire des jours ou des semaines.

Aujourd'hui, l'intégration EDI permet de partager une grande variété de documents, des bons de commande aux factures, en passant par les demandes de devis ou de prêt, et bien plus encore. Dans la majorité des cas, les entreprises qui utilisent l'EDI sont des partenaires commerciaux qui échangent fréquemment des biens et des services dans le cadre de leurs chaînes d'approvisionnement et de leurs réseaux interentreprises. [42],[47]

6.3.3. Choix des outils

Un outil de communication d'entreprise est conçu pour faciliter la diffusion de messages à une audience ciblée. Ces moyens peuvent être numériques ou physiques et servent à communiquer tant en interne (employés) qu'en externe (clients, partenaires) de l'entreprise.

Le choix des outils de communication dépend des objectifs spécifiques que l'entreprise souhaite atteindre.

On distingue principalement deux catégories d'outils de communication en entreprise : interne et externe. Les premiers visent à améliorer la circulation de l'information entre

les collaborateurs, renforcer leur sentiment d'appartenance, améliorer leur bien-être et leur motivation, encourager le travail en équipe et le partage des compétences.

Les seconds, quant à eux, sont utilisés pour mettre en avant l'image de l'entreprise, attirer et retenir les clients, se démarquer de la concurrence, augmenter sa notoriété et sa crédibilité, et accroître son chiffre d'affaires. [48]

6.4. Formation

6.4.1. Compétence

La mise en place progressive de la maintenance 4.0 demande une démarche organisée, débutant par l'évaluation des systèmes existants, l'identification des secteurs où l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA) peuvent être intégrés, ainsi que la formation du personnel et l'instauration d'un système de suivi. Cette méthode permet d'améliorer l'efficacité des opérations de maintenance, de réduire les coûts et de renforcer la performance des équipes.

6.4.2. Métiers

La démarche de mise en œuvre progressive de la maintenance 4.0 concerne plusieurs métiers liés à la maintenance et à la gestion des systèmes informatiques. Ces métiers sont essentiels pour la collecte, le traitement et l'utilisation des données permettant une maintenance plus prédictive et efficace.

Métiers clés

- **Techniciens de maintenance**

Ils sont au cœur de la maintenance 4.0, en tant que collecteurs et interprètes de données, et gestionnaires des alertes issues des systèmes de surveillance.

- **Ingénieurs en gestion des risques**

Ils contribuent à la mise en œuvre de la maintenance 4.0 en identifiant les risques liés à la digitalisation et en mettant en place des mesures de sécurité.

- **Analystes de données (Data Analyst, Data Scientist)**

Ils sont chargés de traiter les données collectées par les systèmes de surveillance afin de prévoir les pannes et d'optimiser les interventions de maintenance.

- **Gestionnaires de projet**

Ils sont responsables de la mise en œuvre et de la coordination des projets de maintenance 4.0, en tenant compte des aspects techniques, humains et financiers.

- **Automaticiens et électrotechniciens**

Ils sont impliqués dans la mise en place des systèmes de surveillance et d'automatisation des machines, en collectant les données nécessaires à la maintenance prédictive.

- **Responsables de production et de maintenance**

Ils sont les acteurs clés de la mise en œuvre de la maintenance 4.0, en définissant les stratégies de maintenance et en pilotant les interventions.

6.4.3. Rôles spécifiques dans la maintenance 4.0

- **Identification des données clés**

Les techniciens de maintenance jouent un rôle crucial dans l'identification des données clés à surveiller pour la maintenance prédictive.

- **Interprétation des données**

Les techniciens doivent être formés à l'interprétation des données collectées par les capteurs et les systèmes de surveillance.

- **Gestion des alertes**

Ils sont responsables de la gestion des alertes issues des systèmes de surveillance et de la prise de décisions en fonction des données.

- **Utilisation des plateformes digitales**

Les techniciens doivent être formés à l'utilisation des plateformes digitales comme les GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) et les solutions de maintenance prédictive.

- **Optimisation des interventions**

Les données collectées permettent aux techniciens d'optimiser les interventions de maintenance en anticipant les pannes.

- **Gestion des risques**

Les ingénieurs en gestion des risques identifient les risques liés à la maintenance 4.0, notamment les risques liés aux données et à la cybersécurité. [30]

Prévoir d'autres formations

Data Analyst : s'intéresse à la signification des données.

Data Scientist : exploite les données, les rend intelligibles et les met en perspectives, aussi les problématiques aux aspects juridiques et éthiques.

Data Manager : s'assure de la cohérence du processus de data management à travers les services de l'entreprise.

Data Architect : se charge de l'architecture de stockage des données et de leur intégration.

Data Steward : gère les flux de données et du respect de l'éthiques et du droit.

Expert en visualisation de données : imagine et désigne les outils, programme les bibliothèques graphiques.



Figure 14.6 : Technicien de maintenance industrielle [54]

Conclusion

La mise en œuvre progressive de la maintenance 4.0 constitue une approche stratégique permettant aux entreprises d'adapter leurs processus de manière structurée et efficace. En combinant l'analyse des systèmes existants, l'intégration ciblée des nouvelles technologies comme l'IoT et l'IA, ainsi que la formation continue des équipes, cette démarche favorise une transition maîtrisée vers une maintenance plus intelligente, prédictive et performante. Elle représente un levier essentiel pour améliorer la fiabilité des équipements, optimiser les coûts et renforcer la compétitivité industrielle.

Chapitre 7 :

**Impact de la maintenance 4.0 sur
l'efficacité opérationnelle de l'entreprise.**

Introduction

La maintenance industrielle a longtemps été perçue comme une fonction réactive, souvent reléguée au second plan dans les stratégies d'entreprise. Cependant, avec l'avènement de l'Industrie 4.0, un tournant majeur s'est opéré : la maintenance est désormais un levier stratégique essentiel pour améliorer l'efficacité opérationnelle, elle est désormais devenue liée au développement durable.

La maintenance 4.0, permet une gestion proactive et prédictive des équipements industriels et participe à l'efficacité opérationnelle de l'entreprise, en plaçant celle-ci sur la voie de la performance durable et de la compétitivité accrue.

7.1. Maintenance et développement durable

La maintenance joue un rôle crucial en tant que levier du développement durable. Elle permet d'optimiser l'utilisation des ressources, de prolonger la durée de vie des équipements et de réduire l'impact environnemental.

La maintenance contribue au développement durable par :

- **l'optimisation des ressources**

La maintenance préventive et prédictive permet d'identifier et de résoudre les problèmes avant qu'ils ne deviennent graves, réduisant ainsi les besoins en remplacement fréquent d'équipements. Cela contribue à économiser les ressources naturelles utilisées pour la fabrication de nouveaux équipements.

- **la réduction des déchets**

En maintenant et en réparant les équipements plutôt qu'en les remplaçant, on limite la génération de déchets. Les pièces détachées peuvent être réutilisées, recyclées ou remises en état, contribuant ainsi à réduire l'empreinte écologique.

- **à l'optimisation de l'efficacité énergétique**

Des équipements bien entretenus fonctionnent de manière plus efficace, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie. La maintenance régulière garantit que les composants sont en bon état de fonctionnement, évitant ainsi les gaspillages d'énergie.

- **à la préservation des écosystèmes**

La maintenance proactive aide à prévenir les incidents environnementaux tels que les fuites de produits chimiques ou les déversements d'huile en identifiant et en corrigeant les problèmes avant qu'ils ne causent des dommages importants aux écosystèmes.

- **à l'allongement de la durée de vie des équipements**

En prenant soin des équipements, on prolonge leur durée de vie utile. Cela réduit la fréquence à laquelle de nouveaux équipements doivent être fabriqués, ce qui entraîne une diminution de la demande de ressources naturelles.

- **aux économies financières**

Une maintenance efficace permet de réaliser des économies à long terme en évitant les coûts élevés liés aux remplacements d'équipements et aux réparations d'urgence. Ces économies peuvent être réinvesties dans des pratiques plus durables.

- **à l'amélioration de la sécurité**

La maintenance préventive contribue à maintenir des conditions de travail sûres, réduisant ainsi les risques d'accidents et de déversements qui pourraient avoir un impact négatif sur l'environnement.[18]

7.2. Impact de la maintenance 4.0 sur l'environnement

La maintenance 4.0 permet d'optimiser les processus de maintenance pour minimiser l'empreinte carbone de l'usine, en anticipant les pannes et en limitant les interventions. Les technologies numériques facilitent la surveillance en temps réel de la consommation d'énergie et des ressources, favorisant des pratiques plus écologiques.

- Actions de la maintenance plus prévisionnelles
- Réduction des temps d'arrêts et anticipation des temps morts
- Amélioration de la qualité de maintenance
- Utilisation des données en temps réel
- Augmentation de la productivité
- Meilleures prises de décisions. [19]

7.3. Optimisation de la consommation énergétique

L'optimisation énergétique dans l'industrie revêt des enjeux majeurs pour le secteur afin d'améliorer sa compétitivité et de réduire ses coûts de fonctionnement. L'optimisation énergétique permet aux entreprises industrielles de réduire leur vulnérabilité face aux variations des prix de l'énergie en identifiant les sources de gaspillage et en adoptant des technologies performantes.[19],[20]



Figure 15.7 : Energie éolienne. [55]

Conclusion

En s'appuyant sur le développement durable et les technologies numériques, la maintenance 4.0 représente un levier stratégique pour améliorer l'efficacité opérationnelle des entreprises industrielles. En réduisant les coûts, en améliorant la productivité et la qualité, et en renforçant les compétences des équipes, elle permet aux entreprises de rester compétitives dans un environnement industriel de plus en plus exigeant.

Chapitre 8 :

Place de l'humain dans l'industrie et la maintenance 4.0.

Introduction

L'industrie 4.0, caractérisée par l'intégration de technologies avancées, transforme en profondeur les processus industriels. Cependant, au-delà de l'automatisation et de la connectivité, l'humain demeure au cœur de cette révolution technologique. Loin de rendre obsolètes les compétences humaines, l'industrie 4.0 valorise l'expertise des opérateurs en les dotant d'outils numériques pour optimiser la production, la maintenance et la sécurité. Cette approche, souvent qualifiée « d'usine centrée sur l'humain », met l'accent sur la collaboration entre l'homme et la machine, visant à améliorer les conditions de travail, réduire les risques et renforcer l'efficacité opérationnelle.

8.1. Conduite du changement

La conduite du changement est l'ensemble des opérations effectuées au sein d'une organisation pour lui permettre de s'adapter au changement et à l'évolution de l'environnement. C'est une modification de caractères par l'apprentissage.

L'objectif de la conduite du changement est de permettre l'acceptation du changement par l'ensemble des équipes et de veiller à ce que ces dernières le vivent au mieux.

Cette méthode consiste à gérer efficacement le pilotage du changement, mais surtout à le faciliter afin qu'il soit compris et accepté par chacun. [42]

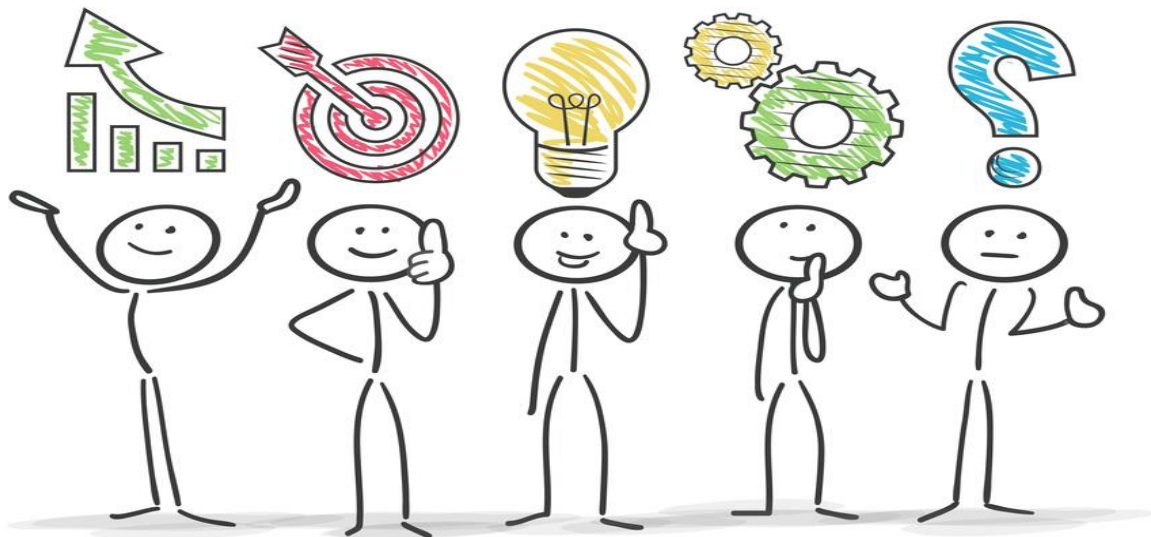


Figure 16.8 : Conduite du changement [41]

8.2. Implication des travailleurs

L'implication des employés illustre l'intérêt et l'enthousiasme qu'éprouvent ces derniers à l'égard de leur travail. Bien qu'elle soit une composante essentielle de la réussite d'une entreprise, les recherches révèlent que seuls 34 % des employés sont motivés par leur environnement professionnel. Il faudrait découvrir comment favoriser l'implication des membres de son équipe et leur donner envie de se dépasser. C'est en les mettant suffisamment en confiance que l'on pourra les pousser à relever de nouveaux défis, partager leurs idées et tisser des liens solides.

D'après des statistiques, 44 % des employés font davantage preuve de motivation lorsque leur travail se révèle intéressant et agréable. Un manager devra donc en tenir compte s'il souhaite aider son équipe à développer efficacement ses compétences, atteindre ses objectifs et s'épanouir professionnellement. Son rôle est essentiel, c'est à lui de tirer son équipe vers le haut et de la motiver au quotidien.

L'implication des employés peut s'illustrer de trois manières différentes, chacune d'entre elles nécessite une stratégie bien particulière :

- **envers l'entreprise**

Il s'agit ici d'évaluer dans quelle mesure les employés s'identifient à l'organisation dans son ensemble et ce qu'ils pensent de la direction.

Pour encourager ce type d'implication, on doit se concentrer sur la culture et les valeurs de son entreprise dans le but de gagner la confiance de ses collègues. C'est en étant suffisamment à l'aise avec le fonctionnement de l'entreprise et son style de management qu'ils s'investiront davantage au quotidien.

- **envers leur manager**

Il s'agit de la relation et des interactions des employés avec leurs supérieurs directs. Pour renforcer ce type d'implication, de nombreux moyens existent. Il faut par exemple apprécier le travail de son équipe à sa juste valeur ou encore de lui donner suffisamment de feedback et de conseils pour progresser efficacement. [43],[44]

- **envers les membres de l'équipe et les parties prenantes**

Il s'agit de la manière dont les employés interagissent avec leurs collègues de travail. En tant que manager, il est important d'aider ses collègues à créer du lien, en organisant par exemple des activités de cohésion d'équipe et des projets transverses.

8.3. Développement de la culture d'entreprise

Développer une culture d'entreprise forte consiste à définir des objectifs et mettre en place des valeurs auxquelles tous les salariés pourront adhérer. Cela prend en compte à la fois la politique de l'entreprise, les procédures et les actions mises en place pour mieux travailler de manière collégiale.

La meilleure culture d'entreprise est celle qui permet d'améliorer les performances de l'entreprise tout en veillant au bien-être des salariés et en créant une identité forte.

Cela donne la possibilité de :

- conserver ses talents pour renvoyer une image plus positive et faire des économies.
- se démarquer pour être mieux reconnaissable et s'imposer dans un secteur d'activité donné.
- de mieux impliquer les salariés qui vont s'engager en conséquence pour valoriser la marque et booster son chiffre d'affaires.
- nécessité d'un chargement plus large dirigé par la direction de l'entreprise.
- Introduction de système de primes et de récompenses de l'effort et de la créativité.
- tolérance à l'égard des échecs.
- célébrer les petits succès.
- formations de qualité selon les besoins d'entreprise.
- propulser l'évolution de la culture organisationnelle. [47]

8.4. Ethique et entreprise 4.0

Les transformations de l'entreprise liées au passage à l'Industrie 4.0 ont un impact important sur l'humain, l'environnement et la société et représentent un véritable avantage concurrentiel pour l'amélioration de la performance industrielle. L'éthique apparaît comme un moyen d'assurer à la fois une intégration "bonne pour tous" des éléments humains et artificiels dans les systèmes de production du futur et une garantie

de performance à long terme. Se pose alors la question de la prise en compte de l'éthique dans ce contexte. [7]

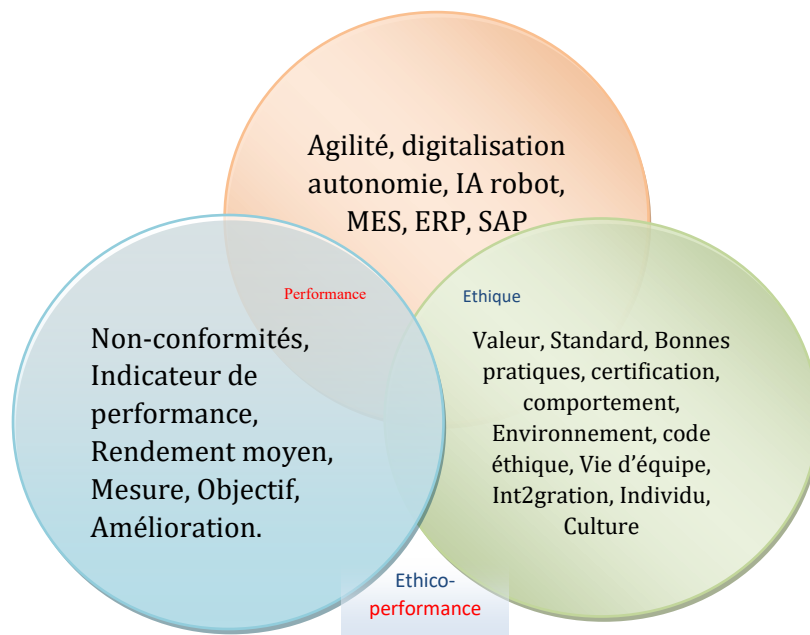


Figure 17.8 : Ethique et industrie 4.0 [39]

Conclusion

La place de l'humain dans l'industrie et la maintenance 4.0 est essentielle et évolutive, loin d'être marginalisée par les avancées technologiques, L'humain demeure au cœur de cette transformation, agissant comme catalyseur de la performance, de la sécurité et de l'innovation.

Dans l'industrie et la maintenance 4.0, l'humain n'est pas remplacé par la technologie ; il en est le moteur. L'industrie 4.0 est ainsi une opportunité pour impliquer et redéfinir le rôle de l'humain dans le monde du travail, en le plaçant au cœur de la transformation digitale. Ainsi, l'humain n'est pas remplacé, mais renforcé par la technologie, dans une dynamique de coévolution bénéfique pour l'entreprise et ses collaborateurs.

Conclusion générale

La maintenance 4.0 représente une transformation majeure dans la gestion des équipements industriels, en s'appuyant sur les technologies numériques telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle, le Big Data et la réalité augmentée. Cette nouvelle approche, proactive et prédictive, permet aux entreprises d'optimiser la performance de leurs outils de production, de réduire les coûts d'entretien et d'améliorer la disponibilité des machines, plus qu'un simple levier technique.

La maintenance 4.0 devient un véritable moteur de compétitivité et d'agilité pour l'entreprise du futur, en s'inscrivant pleinement dans les démarches d'innovation, de durabilité et de transformation digitale. Elle prépare ainsi les organisations à relever les défis de l'industrie 4.0 en intégrant des solutions intelligentes au service d'une production plus efficace, plus flexible et plus résiliente.

L'industrie, l'entreprise et la maintenance 4.0 ne sont qu'une première étape. Après l'entreprise, le Big Data et l'analyse des données, d'autres technologies sont attendues dans les décennies à venir. Les notions d'industrie d'entreprise et de maintenance 5.0 et 6.0 sont déjà évoquées, en intégrant encore davantage la collaboration entre la machine et l'humain, notamment vers l'innovation et le développement intensif de la cobotique, Mais il y aura certainement aussi une industrie 6.0 et d'autres versions, il en sera de même pour la maintenance industrielle et l'entreprise du futur. Ces évolutions porteront sûrement sur le développement de nouvelles technologies au niveau de la « block chain » c'est à dire la base de données. Le développement de l'intelligence artificielle et de l'informatique, figurant aussi dans ce mouvement. D'autre part, les progrès continus des technologies digitales sont contribués à la construction d'un monde nouveau où les clients exigeant des entreprises, la délivrance d'une « expérience » ou d'un résultat, fournis par des services digitaux associés à des produits physiques et non plus un simple équipement matériel. Cependant, l'entreprise du futur ne doit pas omettre le facteur humain, on aura toujours besoin d'hommes dans la maintenance car les éléments et les organes de machines ne se remplaceront pas d'eux même, les robots à titre d'exemple ne savent pas encore vidanger les machines encore moins s'autoréparer. L'homme demeurera donc toujours ou cœur de l'entreprise et de la maintenance du futur.

Bibliographie

1. BENALI L. Maintenance industrielle OPU Alger 2006.
2. BENISAAD Smail, Maintenance industrielle-TEC 336 Publication de l'université Mentouri de Constantine 2004-2005.
3. BEN SAADA S. et FELIACHI D. la maintenance industrielle OPU Alger 2002.
4. BRASSEUR Christophe, Enjeux et usage du Big data, 2ème édition, Lavoisier Hermes, Paris 2016.
5. BUFFARD Pascal, Entreprise & Culture numérique, CBigraf réseaux de grandes entreprises, Paris 2013.
6. CAMARA R.A, MAMEDE H.S, DUARTE DOS SANTOS V. Viable system architecture applied to maintenance 4.0, International conferences Big Data Analytics, Data Mining and Computational intelligence and theory and practise in modern computing, 2019.
7. DI NARDO M, MADOUNA M, ADDONIZIO P, GALLAB M. A mapping analysis of maintenance in industry 4.0, journal of applied research and technology, vol.19, N°6, décembre 2021.
8. David L. Bourell, « Perspectives on Additive Manufacturing », Annual Review of Materials Research, vol. 46, no 1, 1er juillet 2016.
9. Editional smart industries, osez l'industrie du futur N°11 Décembre 2016.
10. Editional smart industries, osez l'usine du futur No16 Février 2018.
11. Jautomatise, manufacturing.fr, Mars-Avril 2018.
12. KACZMAREK M.J, ANTOSZ K, ZHANG C, WASZKOWKI R. Assessing the barriers to industry 4.0 implementation from a maintenance management perspective-Pilot study results, IFAC papers online 55-2 (2022) 223-228.

Références bibliographiques

13. KACZMAREK M.J, LEGUTKO S, KLUK P. Maintenance 4.0 technologies, New opportunities for sustainability driven maintenance, Management and production engineering Review, Volume 11,N°2, juin 2022, PP77-87.
14. KACZMAREK M.J, GOLA A. Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing on overview, IFAC papers online. Line (2019)91-96 sciences Direct.
15. LEMBERGER Pirmin, BATTY Marc, MOREL Médéric, RAFFAELLI Jean-Luc, Big Data et Machine Learning, DUNOD, 2ème édition, Paris 2016.
16. Le journal, digital or not digital ?, Numéro 81, Mars 2017.
17. L'usine nouvelle, A l'assaut de l'usine du futur, N°3554, semaine du 15 au 21 Mars 2018.
18. MAHI Abdelmoumen, Implication de l'assurance qualité dans la maintenance industrielle ; mémoire de fin d'étude en génie mécanique, soutenu le 29/09/2022, université A.B de Tlemcen.
19. MAMI Elias Fouad, Détermination des critères d'optimisation de la maintenance industrielle par le management de la qualité, Thèse de doctorat université A.B de Tlemcen, 2019.
20. MAMI Elias Fouad, la maintenance 4.0 au service de l'usine du futur, conférence internationale sur l'énergie et la ville du futur, EVF 2024, Les Mureaux, France.
21. Manon Saint.E, Maintenance 4.0 : définition, caractéristiques et avantages, 2023.
22. MONCHY François, la fonction maintenance, formation à la gestion de la maintenance industrielle, Masson, Paris 2016.
23. RODA I, MACCHI M. Maintenance concepts evolution : a comparative review towards advanced maintenance conceptualization, Computers in industry 133(2021) 103531.
24. RUSSELLE S, Norvig P, Intelligence artificielle, 3e édition, Pearson education France, 2010.

Références bibliographiques

25. SARJE S.H, KUMBHALKAR M.A, WASHIMKAR D.N, KULKARNI.R.H, JAYBHAYE M.D, AL DOORI W.H, Current scenario of maintenance 4.0 and opportunities for sustainability – driven maintenance, ASSET Vol 7, NO1, january 2025.
26. SHAHEEN B.W, NEMETH I. Integration of maintenance management system fonctions with industry 4.0 technologies and features- A review, process MDPI 2022, 10, 2173.
27. SHAHEEN Basherr Wasef, Integration of maintenance management system functions with industry 4.0 technologies and features – A review, Precesses 2022,10,2173.
28. Toki Patrick William, Méthodologie d'étude et de la mise en place d'un modèle de maintenance 4.0, Mémoire de fin d'étude, Montréal, 18 décembre 2023.
29. VADEBONCOEUR Robert, Mémoire en génie de la gestion l'innovation, Ecole de technologie supérieure, Montreal 11 novembre 2022
30. WOJCIECHOWSKA S.W, WINIARSKA K. Maintenance performance in the age of industry 4.0 : A bibliometric performance analysis and a systematic literature Review.

47. <https://fr.linkedin.com/pulse/la-maintenance-au-service-du-d%C3%A9veloppement-durable-oussema-ouerghemmi-lzine#:~:text=La%20maintenance%20joue%20un%20r%C3%B4le,de%20r%C3%A9duire%20l'impact%20environnemental>. Consulté le 13/05/2025
48. <https://opera-energie.com/optimisation-energetique-industrie/>. Consulté le 13/05/2025
49. <https://asana.com/fr/resources/employee-engagement>. Consulté le 13/05/2025
50. <https://www.lumapps.com/fr/experience-collaborateur/etapes-cles-developper-culture-entreprise-forte#:~:text=D%C3%A9velopper%20une%20culture%20d'entreprise%20forte%20consiste%20%C3%A0%20d%C3%A9finir%20des,mieux%20travailler%20de%20mani%C3%A8re%20coll%C3%A9giale>. Consulté le 13/05/2025
51. <https://www.entreprises.gouv.fr/secteurs-dactivite/industrie/les-comites-strategiques-de-filiere/la-filiere-solutions-industrie-du#:~:text=L'industrie%20du%20futur%20d%C3%A9signe,nouvelles%20exigences%20environnementales%20et%20sociales>. . Consulté le 10 avril 2025.
52. <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.fanuc.co.jp%2Fen%2Fprofile%2Fproduction%2Ffactory1.html&psig=AOvVaw2DWWqLbbxcNR7X0PgOadGJ&ust=1749756895883000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhxqFwoTCNCKiseO6o0DFQAAAAAdAAAAABAe>. Consulté le 16 avril 2025.
53. https://www.researchgate.net/figure/Etapes-dun-apprentissage-dIM-axe-sur-la-progressivite-Le-sujet-prend-conscience-des_fig3_310449645. Consulté le 18 avril 2025.
54. https://www.google.com/search?sca_esv=bf3c0b79a425e9da&sxsrf=AE3Tif0xnTWVOXfxzhkcZYU3qepRdXolvw:1749674017958&q=%E2%80%A2+Techniciens+d+e+maintenance&udm=2&fbs=AlljpHx4nJjfGojPVHhEACUHPiMQ_pbg5bWizQs3A_kle_njtcu6bV11DK4mkTb9J80J_C-SIwUJOI6tln0bmCo7yht_lmRX_mh_1s-1o8qxjeMX1SHmNKM6WpUzDF4VAi4BZHhfyoCEL_qewAWquU631GrJJotlA4cT9FeMvu8o0bMD-lt0VzqipR12zMKDScIOQ4FPoZn_ch9-a_9SoYWKdv8FIRQXgA&sa=X&ved=2ahUKEwj8usDSm-qNAXWjckQEHbOiPI4QtKgLegQIFRAB&biw=1366&bih=641&dpr=1#vhid=DV7YX6HYlf7gJM&vssid=mosaic.
55. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>.