

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عداية

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Science et technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et
Productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Contribution à l'intégration de l'industrie 4.0 dans les
petites et moyennes industries (PMI)**

Présenté par : HARIKI Fatma Zohra

Encadrant : LAGRED Ahmed

Grade : Professeur

Université : UBMA

Jury de soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
LAGRED	Professeur	UBMA	Encadrant
BENCHIHEB	MCA	UBMA	Examinateur
BOUZIANE	MCB	UBMA	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

Dédicaces

Avec l'aide de dieu j'ai pu réaliser ce travail que Je dédie ce travail avec tout mon amour et ma reconnaissance :

À ma chère mère, pilier de ma vie, pour son amour, ses sacrifices et son soutien inconditionnel,

À la mémoire de mon père, que dieu lui accorde sa miséricorde, dont les prières et les valeurs continuent de me guider chaque jour,

À mon frère, pour sa présence, ses encouragements et sa confiance en moi,

À tous les membres de ma grande et précieuse famille Bouzellat, pour leur affection et leur soutien moral,

À mes amies chères à mon cœur : Ghendour Amel, Saker Meriem, Chaima Guenadil, Nourhane Chouah, et Sourour Delimi merci pour votre amitié sincère et votre présence à mes côtés,

Et à tous mes amis, anciens comme nouveaux, qui ont, d'une manière ou d'une autre, marqué ce parcours et m'ont aidé(e) à avancer.

Ce travail est le fruit d'un chemin partagé avec vous. Merci d'en faire partie.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Allah, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné, la santé, la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier très chaleureusement mon encadreur : Le PR : A. LAGRED qui m'a formé et ménagé tout au long de cette année, il m'a fait partager toute sa compétence, son savoir et ses nombreuses idées, avec confiance. Ce travail a donc été un réel plaisir grâce à lui.

Je tiens à remercier tous les enseignants de mon département et notamment mes professeurs Mme SELMA et Mr. BENCHIHEUB.

Je remercie tout le personnel du complexe El-Hadjar, pour leur collaboration précieuse, l'ingénieur Mdm Asma Grid et Mme Fatima Zohra et tous les ingénieurs du bureau technique, pour leur encadrement technique et leur expertise, Et enfin, les opérateurs, dont le travail rigoureux a été d'une grande aide.

À toutes et tous, je vous suis infiniment reconnaissant(e) d'avoir contribué à la réussite de ce projet.

Résumé

Depuis les années 1990, l'Algérie connaît une transformation économique majeure marquée par l'ouverture à l'économie de marché. Ce changement a favorisé l'émergence d'un tissu entrepreneurial dynamique, dans lequel les Petites et Moyennes Entreprises et Industries (PME/PMI) occupent désormais une position centrale. Elles sont devenues des acteurs clés du développement industriel, en raison de leur capacité d'adaptation, de leur flexibilité organisationnelle et de leur rôle dans la création d'emplois et la valorisation des ressources locales.

Dans ce contexte de mutation structurelle, notre mémoire, intitulé « Contribution à l'intégration de l'industrie dans les PMI et amélioration de la qualité par la commande numérique : cas des AMM – Complexe sidérurgique d'El-Hadjar », vise à explorer deux axes complémentaires : d'une part, les stratégies de développement économique à mettre en œuvre pour renforcer l'intégration industrielle des PMI, et d'autre part, les moyens techniques permettant d'améliorer la qualité des produits fabriqués, notamment par l'usage des technologies avancées telles que la commande numérique.

L'étude s'articule autour de plusieurs étapes. D'abord, elle examine l'organisation actuelle de la production au sein des PMI afin d'identifier les leviers d'optimisation et les obstacles à surmonter pour une meilleure intégration dans les chaînes de valeur industrielles. Ensuite, elle s'intéresse aux critères de qualité des produits issus de ces structures, en mettant en lumière les enjeux de normalisation, de précision et de compétitivité. Enfin, elle s'appuie sur une étude de cas réalisée au niveau des « Ateliers de Maghrébin Mécanique (AMM) » du « complexe sidérurgique d'El-Hadjar », afin d'évaluer l'apport réel de l'utilisation des « machines-outils à commande numérique (MOCN) » dans l'amélioration de la performance industrielle.

L'objectif global de ce mémoire est donc de démontrer comment une meilleure intégration industrielle des PMI, couplée à l'implémentation de technologies numériques avancées, peut contribuer à moderniser le secteur productif national, à réduire la dépendance technologique et à renforcer la compétitivité industrielle de l'Algérie sur le long terme.

Mots-clés

PME/PMI, intégration industrielle, stratégie de développement, qualité, commande numérique, machines-outils, El Hadjar, AMM, fabrication intelligente.

Abstract.

Since the 1990s, Algeria has undergone a major economic transformation marked by the opening up to a market economy. This change has fostered the emergence of a dynamic entrepreneurial network, in which Small and Medium-Sized Enterprises and Industries (SMEs/SMIs) now occupy a central position. They have become key players in industrial development, due to their adaptability, organizational flexibility, and their role in job creation and the development of local resources.

In this context of structural change, our thesis, entitled "Contribution to the Integration of Industry in SMIs and Improving Quality through Digital Control: The Case of AMM - El-Hadjar Steel Complex," aims to explore two complementary areas: first, the economic development strategies to be implemented to strengthen the industrial integration of SMIs, and second, the technical means to improve the quality of manufactured products, particularly through the use of advanced technologies such as digital control. The study is structured around several stages. First, it examines the current organization of production within SMEs to identify optimization levers and obstacles to overcome for better integration into industrial value chains. Next, it examines the quality criteria of the products produced by these structures, highlighting the challenges of standardization, precision, and competitiveness. Finally, it draws on a case study conducted at the "Ateliers de Maghrébin Mécanique (AMM)" of the "El-Hadjar steel complex" to assess the real contribution of the use of "numerically controlled machine tools (NCM)" in improving industrial performance.

The overall objective of this thesis is therefore to demonstrate how better industrial integration of SMEs, coupled with the implementation of advanced digital technologies, can contribute to modernizing the national production sector, reducing technological dependence, and strengthening Algeria's industrial competitiveness over the long term.

Keywords: SMEs/SMIs, industrial integration, development strategy, quality, numerical control, machine tools, El Hadjar, AMM, smart manufacturing.

الملخص:

منذ تسعينيات القرن الماضي، شهدت الجزائر تحولاً اقتصادياً كبيراً اتسم بالانفتاح على اقتصاد السوق. وقد عزز هذا التحول ظهور شبكة ريادية ديناميكية، تحتل فيها المؤسسات والصناعات الصغيرة والمتوسطة مكانة محورية. وقد أصبحت هذه المؤسسات والصناعات لاعباً رئيسياً في التنمية الصناعية، بفضل قدرتها على التكيف ومرؤونتها التنظيمية ودورها في خلق فرص العمل وتنمية الموارد المحلية. في سياق هذا التحول الهيكلبي، تهدف أطروحتنا، المععنونة "المساهمة في تكامل الصناعة في المؤسسات والصناعات الصغيرة والمتوسطة وتحسين الجودة من خلال التحكم الرقمي: حالة مجمع AMM للصلب - الحجار"، إلى استكشاف مجالين متكاملين: أولاً، استراتيجيات التنمية الاقتصادية التي ينبغي تنفيذها لتعزيز التكامل الصناعي للمؤسسات والصناعات الصغيرة والمتوسطة، وثانياً، الوسائل التقنية لتحسين جودة المنتجات المصنعة، لا سيما من خلال استخدام التقنيات المتقدمة مثل التحكم الرقمي. وتكون الدراسة من عدة مراحل. أولاً، يدرس هذا البحث التنظيم الحالي للإنتاج داخل الشركات الصغيرة والمتوسطة لتحديد آليات التحسين والعقبات التي يجب التغلب عليها لتحقيق اندماج أفضل في سلاسل القيمة الصناعية. ثم يدرس معايير جودة المنتجات التي تنتجها هذه الهياكل، مسلطًا الضوء على تحديات التوحيد القياسي والدقة والقدرة التنافسية. وأخيراً، يستند إلى دراسة حالة أجريت في "ورشة المغرب الميكانيكي" التابعة لمجمع الحجر للصلب لنقييم المساهمة الحقيقية لاستخدام "أدوات الآلات ذات التحكم الرقمي" في تحسين الأداء الصناعي.

يهدف هذا البحث بشكل عام إلى توضيح كيف يمكن للتكامل الصناعي الأفضل للشركات الصغيرة والمتوسطة، إلى جانب تطبيق التقنيات الرقمية المتقدمة، أن يُسهم في تحديث قطاع الإنتاج الوطني، وتقليل الاعتماد على التكنولوجيا، وتعزيز القدرة التنافسية الصناعية للجزائر على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية: الشركات الصغيرة والمتوسطة/الصناعات الصغيرة والمتوسطة، التكامل الصناعي، استراتيجية التنمية، الجودة، التحكم الرقمي، أدوات الآلات، الحجر، ورشة المغرب الميكانيكي، التصنيع الذكي.

LISTE D'ABREVIATION

PMI/PME : Petite et Moyenne Industrie/Petite et Moyenne Entreprise.

OCDE : Organisation et Coopération et Développement.

CNI : Commission Nationale des Investissements.

AGI : Autorisation Globale d'Importation.

FGAR : Fonds de Garanties des Crédits-PME.

ANSEJ : Agence Nationale de Soutien à l'Emploi des Jeunes.

CNAC : Caisse Nationale de l'Assurance Chômage.

ANGEM : Agence Nationale de Gestion du Microcrédit.

BADR : Banque Algérienne de Développement.

PIB : Produit Intérieur Brut.

NLP: Natural Language Processing.

ERP: Enterprise Resource Planning.

MES: Manufacturing Execution System.

GPAO : Gestion de la Production Assistée par Ordinateur.

IMMP : Intelligent Maintenance Management Platform.

Table des matières

Dédicaces	2
Remerciements	3
Résumé	4
INTRODUCTION GENERALE	14
Chapitre 1 : Etude bibliographique	18
I-1. Importance des PMI dans le développement économique	20
I-1.1. Définition des PMI.....	20
I-1.2. Pourquoi les PMI sont essentielles dans les pays en développement?	21
I-1.2. L'INDUSTRIE ALGERIENNE ET LA PLACE DES PME/PMI	21
I-1.3. Importance et rôle des PME/PMI pour le développement économique algérien	25
I-2. Généralités sur l'évolution de l'industrie (industrie1.0, industrie2.0, industrie3.0, industrie4.0).....	28
I-3. L'intégration de l'industrie 4.0 dans les PMI [14]	33
I-3.1. L'industrie 4.0	33
I-3.1.1. Compréhension de la genèse de l'industrie 4.0.....	33
I-3.1.2. Définition de l'industrie 4.0 :	35
Chapitre 2 : La fabrication intelligente dans les PMI.....	41
II-1. L'intelligente artificiel dans la fabrication [15]	43
II-1.1. Définition.....	43
II-1.2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?.....	43
II-1.3 Les 7 types d'intelligence artificielle.....	44
II-1.4. Les grands domaines de l'intelligence artificielle	46
II-1.5. Intelligence artificielle (IA) dans le secteur de la fabrication	47
II-1.6. Qu'est-ce que l'IA dans le secteur de la fabrication?	48
II-1.7. Les avantages de l'IA pour l'industrie manufacturière [17].....	48
II-2. Optimisation des procès de fabrication dans les PMI par l'intelligente artificiel	58
II-2.1. Définition de l'optimisation des procédés de fabrication	58
II-2.2. Qu'est-ce que l'Intelligence Artificielle et son impact sur la productivité?	59
II-2.3. Apport de l'intelligence artificielle dans cette optimisation.....	59
II-2.4. Applications concrètes dans les PMI.....	60
II-2.5. Enjeux et défis pour les PMI	61
II-2.6. Perspectives d'évolution.....	61
II-3. Plateforme de maintenance intelligente	62
II-3.1. Définition.....	62

II-3.2. Les 3 types de maintenance intelligente	63
II-3.3. Architecture technique et composants des plateformes de maintenance intelligente	65
II-3.4. Fonctionnement global des plateformes de maintenance intelligente	66
II-3.5. Exemples concrets de plateformes de maintenance intelligente	68
II-3.6. Bénéfices et défis de la mise en œuvre des plateformes de maintenance intelligente dans les PMI	70
Chapitre 3 : Les principales technologies de l'industrie 4.0	73
III-1. Le big data.....	74
III-1.1. Qu'est-ce que le big data?	75
III-1.2. Les 5 V du big data	76
III-1.3. Pourquoi le Big Data est devenu essentiel?	76
III-1.4. Big Data et Business Intelligence.....	77
III-1.5. Big Data et innovation.....	77
III-1.6. Une optimisation des coûts et investissements	77
III-1.7. Analyse et stockage Big Data: les entrepôts de données et data lakes.....	78
III-1.8. Big Data, cloud computing et informatique sans serveur	79
III-1.9. Utiliser le Big data: outils, produits et services.....	80
III-1.10. Qu'est-ce que le big data dans l'industrie 4.0?.....	82
III-1.11. Quels sont les avantages du big data pour les entreprises dans l'industrie 4.0?.....	82
III-1.12. Traitement et analyse des big data	82
III-1.13. Automatisation et robotique : l'apport décisif du big data.....	83
III-1.14. Cas d'usage concrets du Big Data dans l'industrie 4.0	85
III-2. L'impression 3D	86
III-2.1. L'histoire de l'impression 3D	87
III-2.2. Logiciels d'impression 3D.....	88
III-2.3. Les principales technologies d'impression 3D [26]	89
III-2.3.1. Extrusion et dépôt de fil fondu (FDM, FFF)	90
III-2.3.2. Résine et photopolymérisation (SLA, DLP).....	91
III-2.3.3. Frittage de poudre et fusion (SLS, SLM...)	93
III-2.4. À quoi servent les imprimantes 3D ? [27].....	95
III-2.4. Applications concrètes dans l'industrie.....	97
III-2.5. Perspectives d'évolution	97
III-2.6. Les principaux secteurs industriels de l'impression 3D [28].....	98
III-2.7. L'avenir de l'impression 3D	103
III-2.8. L'importance de l'impression 3D dans l'industrie 4.0.....	104

III-3. L'Internet des objets	105
III-3.1. Qu'est-ce que l'Internet des objets (IoT) ?	106
III-3.2. Définition et différences avec l'IoT classique.....	106
III-3.3. Définition détaillée de l'IoT.....	107
III-3.4. Histoire de l'IoT.....	108
III-3.5. Pourquoi l'IIoT est-il clé pour l'industrie?	109
III-3.6. Comment l'IIoT s'inscrit-il dans l'industrie 4.0?.....	109
III-3.7. Comment fonctionne l'IoT ?.....	110
III-3.8. Exemples d'application de l'IoT industriel	111
III-3.9. Exemples de réseaux IoT en action.....	112
II-3.11. IoT d'entreprise vs IoT industriel (IIoT)	114
III-3.12. Avantages de l'IoT pour l'industrie	115
III-3.13. Quelles sont les technologies IoT industrielles?	117
III-3.14. Sécurité pour les systèmes cyberphysiques.....	118
III-3.14.1. Device de journalisation électronique (ELD)	119
III-3.14.2. Intelligent Edge.....	119
III-3.14.3. Maintenance prédictive.....	119
III-3.14.4. Identification par fréquence radio (RFID)	119
III-3.15. Tendances et perspectives de l'IIoT en 2025	119
III-3.15.1 Vers une écoresponsabilité renforcée avec l'IIoT	119
III-3.15.2. Impact des réseaux 5G et de l'Edge Computing sur l'IIoT	120
III-3.15.3. La blockchain et l'intelligence artificielle : innovations 2025	120
III-3.16. L'avenir de l'IoT	120
Chapitre 4 : Proposition d'un programme d'usinage des couronnes dentées à CNC	122
IV-1. Structure d'un programme	123
IV-2. Les différents types de MOCN	123
IV-3. Classification des MOCN [36]	124
IV-3.1. Classification selon la nature de déplacement	124
IV-3.2. Classification selon le nombre d'axes.....	126
IV-4. Les types des MO à tailler les couronnes dentées à CNC	128
IV-4.1. Définition	128
IV-4.2. Qu'est-ce que la programmation CNC?	128
IV-4.3. Les codes et fonctions	129
IV-5. Proposition d'un programme d'usinage des couronnes dentées à CNC au niveau Les AMM	139
IV-5.1. Définition de la pièce choisie	139

IV-4.2. Quelques informations sur la composition chimique de le matériau à usiner:	139
IV-5.3. Calcul du régime de coupe.....	140
IV-5.4. Le mode d'obtention de l'ébauche dans l'entreprise AMM	142
IV-5.5. Donnés de départ de l'entreprise	142
IV-5.5.1. Condition de coupe en taillage	142
IV-5.5.2. Les programmes CNC	143
IV-4.4.3. La gamme d'usinage	145
CONCLUSION GENERALE	152

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Définition des PMI	21
Figure 2: Schéma d'Evolution des PME/PMI en Algérie durant 2003-2010.....	24
Figure 3: Schéma d'Evolution des emplois PME/PMI en Algérie durant 2004-2010	27
Figure 4: Les quatre révolutions industrielles.....	29
Figure 5: les quatre révolutions industrielles. Source, (ministère de l'Économie (MES!)), 2016).....	34
Figure 6: Poids des facteurs de valeur.....	38
Figure 7: Illustration des axes d'Intégration et leurs relations.....	39
Figure 8: L'intelligente artificiel (IA)	43
Figure 9: L'intelligence artificielle (IA) dans la fabrication	47
Figure 10: Collaboration entre les robots et les humains	49
Figure 11: Amélioration de la communication grâce à l'IA de traduction	52
Figure 12: Maintenance prédictive.....	53
Figure 13 : Logiciel d'impression 3D de conception	88
Figure 14: Le processus d'impression 3D par dépôt de filament fondu	90
Figure 15: Technologies SLA laser, DLP, LCD (MSLA) expliquées.	92
Figure 16: Support de roulement - Pièce usinée et pièce imprimée en 3D puis gravée.....	99
Figure 17: Moule hybride.....	100
Figure 18: Capot de différentiel	102
Figure 19: Moule imprimé en 3D et usiné	103
Figure 20: Les quatre étapes clés de l'Internet des Objets	110
Figure 21: Trajectoires en positionnement point à point	125
Figure 22: Fraisage paraxiale.	125
Figure 23: Contournage CNC	125
Figure 24: Axes primaires et axes additionnels.	127
Figure 25: Structure d'un programme.	128
Figure 26 : Echantillon de forge.....	142
Figure 27: Le four à gaz.	142

LISTE DES TABTEAUX

Tableau 1: Evolution des PME/PMI en Algérie durant 2003-2010.....	24
Tableau 2: Evolution des emplois/PME/PMI en Algérie durant 2004/2010	25
Tableau 3: Classification suivant le nombre d'axe.....	126
Tableau 4: Adresses utilisées.....	129
Tableau 5: fonctions préparatoires.....	130
Tableau 6: Fonctions auxiliaires	131
Tableau 7: Les lettres-adresses usuelles retenues	135
Tableau 8: Fonctions préparatoires (G)	137
Tableau 9: Fonctions auxiliaires (M).....	138
Tableau 10: Propriétés chimiques de matériau.....	139
Tableau 11: Propriétés mécaniques de matériau.....	139
Tableau 12: Tableau des vitesses de coupe et des avances pour le dressage.....	140
Tableau 13: Les caractéristiques de la pièce	141
Tableau 14: Condition de coupe de taillage extérieure.....	142

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution récente des économies à l'échelle mondiale a mis en évidence un changement profond dans les structures productives. Alors que les grandes entreprises dominaient traditionnellement la scène industrielle, l'accent s'est peu à peu déplacé vers les petites et moyennes entreprises (PME) et les petites et moyennes industries (PMI), devenues aujourd'hui des acteurs centraux du développement économique, social et territorial. Ce renversement s'explique en partie par la crise économique des années 1980, qui a fortement ébranlé les grands ensembles industriels et mis en évidence leurs limites en termes d'adaptabilité et de résilience face à des contextes changeants et imprévisibles.

Les PME/PMI, par leur souplesse organisationnelle, leur taille humaine et leur capacité à réagir rapidement aux évolutions du marché, sont apparues comme des structures plus aptes à soutenir l'économie en période de turbulence. Elles jouent aujourd'hui un rôle clé dans la création d'emplois, l'innovation technologique, la production de richesse locale, la valorisation des ressources territoriales et le renforcement des capacités industrielles nationales. Leur développement ne se limite pas à des considérations économiques ; il s'inscrit également dans une logique de cohésion sociale, de réduction des inégalités régionales et de promotion d'un entrepreneuriat endogène.

L'une des dimensions fondamentales du rôle des PME/PMI réside dans leur contribution à l'intégration industrielle. Cette intégration se manifeste par la mise en réseau des unités de production à travers des relations de sous-traitance, de co-traitance ou de partenariat avec d'autres PME, mais également avec de grandes entreprises. Ce maillage industriel permet de structurer des filières locales, de limiter les importations, de créer de la valeur ajoutée nationale et de favoriser la montée en compétence des structures productives. La sous-traitance, en particulier, apparaît comme un levier de développement stratégique, en facilitant l'accès aux marchés, aux technologies et à l'expertise industrielle.

Par ailleurs, dans un contexte de mondialisation accrue et de concurrence internationale intense, les PME/PMI sont confrontées à une exigence croissante en matière de qualité. La qualité n'est plus seulement une contrainte, mais un véritable facteur de différenciation et de compétitivité. Elle influe directement sur l'image de marque, la fidélisation des clients, la conquête de nouveaux marchés et l'efficacité des processus internes. Dans ce cadre, la gestion de la qualité devient un pilier stratégique, nécessitant des démarches structurées, des outils performants et une culture d'amélioration continue.

INTRODUCTION GENERALE

À cela s'ajoute l'irruption des technologies issues de la quatrième révolution industrielle, communément appelée « industrie 4.0 », qui redéfinit en profondeur les modes de production. Les systèmes cyber-physiques, l'intelligence artificielle, l'Internet des objets, la fabrication additive, la robotique collaborative ou encore le big data ouvrent de nouvelles perspectives pour les PME/PMI. Ces technologies permettent d'optimiser les processus, d'accroître la précision des opérations, de réduire les gaspillages et de répondre aux exigences de personnalisation croissante des produits. Elles transforment également les modèles de gestion, imposant une transition vers des systèmes de « fabrication intelligente » (smart manufacturing), où l'interconnexion et l'autonomie des machines jouent un rôle déterminant.

En Algérie, malgré une désindustrialisation progressive et une faible intégration industrielle (inférieure à 15 % dans certains secteurs), les PME/PMI sont appelées à jouer un rôle central dans les efforts de relance économique. Le pays dispose d'un tissu entrepreneurial important, d'un potentiel humain et matériel significatif, mais souffre encore d'un manque de structuration, de financement, de transfert technologique et de formation. L'enjeu est donc double : renforcer la compétitivité des PMI existantes, tout en les accompagnant dans l'intégration de technologies modernes et dans la mise en œuvre de systèmes de gestion de la qualité adaptés aux standards internationaux.

Dans ce contexte, les « machines-outils », et plus spécifiquement les « machines à commande numérique (CNC) », occupent une place stratégique. Elles représentent le cœur de l'activité industrielle, car elles permettent la transformation précise et efficace des matières premières en produits finis, tout en assurant une meilleure répétabilité, une automatisation des tâches et une réduction des erreurs humaines. Leur introduction dans les PMI constitue un passage essentiel vers la modernisation des ateliers, l'optimisation des temps de production et l'amélioration globale de la qualité.

Face à ces constats, ce mémoire s'attache à étudier la place et le rôle des PME/PMI dans le développement économique, tout en mettant en lumière les enjeux liés à la qualité de production, à l'innovation technologique et à l'intégration de l'industrie 4.0. Il s'organise en 4 chapitres complémentaires :

- Le « premier chapitre » présente une étude bibliographique approfondie sur les PME/PMI, leur évolution, leur rôle économique et les principales problématiques qu'elles rencontrent dans un environnement mondialisé ;

INTRODUCTION GENERALE

- Le « deuxième chapitre » traite de la fabrication intelligente dans les PMI, en insistant sur les apports technologiques récents et les transformations organisationnelles qu'elle implique ;
- Le « troisième chapitre » explore les principales technologies de l'industrie 4.0, tout en introduisant les concepts liés à l'automatisation, au numérique et à l'interconnexion des processus industriels ;
- Le « quatrième chapitre » propose un programme d'usinage appliqué aux couronnes dentées, en s'appuyant sur l'utilisation de machines CNC, et met en évidence les paramètres techniques et de qualité à prendre en compte dans ce type de production ;et présente aussi une étude de cas réelle portant sur l'amélioration de la qualité d'une couronne usinée au sein de l'Atelier de Maghrébin Mécanique (AMM) du complexe sidérurgique d'El-Hadjar à Annaba, afin d'illustrer concrètement les apports de l'approche qualité dans le contexte industriel algérien.

À travers cette analyse, ce mémoire vise à démontrer que les PME/PMI, bien qu'elles soient confrontées à de nombreux défis, disposent d'un potentiel important pour devenir des piliers de l'économie moderne. Leur montée en puissance passe par une meilleure organisation de la production, une ouverture vers l'innovation technologique, une intégration plus poussée dans les chaînes industrielles, ainsi qu'une gestion rigoureuse de la qualité.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Introduction :

Dans un monde en perpétuelle mutation, où la compétitivité, l'innovation et l'agilité conditionnent la pérennité des entreprises, les Petites et Moyennes Industries (PMI) se trouvent aujourd'hui à la croisée des chemins. Longtemps perçues comme de simples sous-traitantes ou unités de production à échelle réduite, les PMI occupent désormais un rôle central dans les stratégies de développement économique, tant au niveau local que global.

En effet, les PMI constituent la colonne vertébrale de nombreuses économies. Elles représentent une part significative du tissu industriel mondial, tant en termes de nombre d'entreprises que d'emplois créés. Leur agilité, leur capacité d'adaptation et leur proximité avec les réalités du terrain font d'elles des actrices clés de l'innovation incrémentale, de la résilience économique et de la compétitivité territoriale. Toutefois, cette importance stratégique ne les met pas à l'abri des défis systémiques engendrés par l'évolution rapide des technologies et des modes de production.

C'est dans ce contexte qu'intervient la quatrième révolution industrielle, ou industrie 4.0, qui bouleverse les paradigmes traditionnels de l'industrie. Pour bien appréhender cette mutation, il est nécessaire de revenir brièvement sur les étapes historiques qui ont jalonné l'évolution industrielle :

- L'industrie 1.0 (fin XVIII^e – début XIX^e siècle) inaugure l'ère de la mécanisation grâce à la machine à vapeur et à l'énergie hydraulique.
- L'industrie 2.0 (fin XIX^e – début XX^e siècle) voit naître la production de masse, l'électrification des usines et les premières chaînes de montage.
- L'industrie 3.0 (années 1970) introduit l'automatisation et l'informatisation des processus industriels, grâce aux technologies numériques et aux systèmes de contrôle.
- Enfin, l'industrie 4.0 (débutée dans les années 2010) marque l'avènement des systèmes cyber-physiques, de l'Internet des Objets (IoT), de l'intelligence artificielle, de la fabrication additive (impression 3D), du Big Data et de l'analyse prédictive.

Cette transition vers des usines intelligentes, interconnectées et autonomes représente une formidable opportunité pour les entreprises, mais également un défi considérable, notamment pour les PMI. Contrairement aux grandes entreprises qui disposent souvent de départements R&D structurés et de ressources financières importantes, les PMI doivent faire preuve

d'ingéniosité pour intégrer ces nouvelles technologies tout en assurant leur viabilité économique.

L'intégration de l'industrie 4.0 dans les PMI ne se limite pas à une simple adoption technologique. Elle implique un changement profond dans l'organisation du travail, les compétences requises, les modèles économiques et les relations avec les partenaires et les clients. Ce processus de transformation nécessite une vision stratégique claire, un accompagnement ciblé, et des politiques publiques favorables à l'innovation et à la numérisation des PME/PMI.

Face à ces constats, ce chapitre bibliographique se propose d'explorer, à travers une analyse structurée des travaux académiques et professionnels existants :

- L'importance structurelle et fonctionnelle des PMI dans le développement économique ;
- L'évolution progressive de l'industrie, depuis la première révolution industrielle jusqu'à l'ère actuelle de l'industrie 4.0 ;
- Les modalités, bénéfices attendus et freins rencontrés dans l'intégration de l'industrie 4.0 par les PMI.

Cette réflexion vise à mieux comprendre les leviers d'action disponibles pour accompagner les PMI dans leur transition vers une industrie plus intelligente, plus connectée et plus durable.

I-1. Importance des PMI dans le développement économique

I-1.1. Définition des PMI

Les PMI, ou Petites et Moyennes Industries, bien qu'elles partagent ces critères de taille, se distinguent par leur activité principale, généralement orientée vers la production industrielle. Elles se caractérisent par leurs capacités de production, leurs procédés techniques et leur contribution à des chaînes de valeur souvent plus complexes que celles des entreprises de services.

Cette distinction sectorielle est essentielle car elle influe sur les besoins spécifiques en termes d'infrastructures, de financement et de régulation.

La compréhension claire de ces définitions est cruciale pour les politiques publiques et les initiatives privées qui visent à encourager le développement de ces entreprises. En étant précis sur les critères de classification, les gouvernements peuvent mettre en place des mesures adaptées pour soutenir leur croissance. De plus, une meilleure compréhension par le grand public permet de valoriser les rôles respectifs des PMI au sein de l'économie [1].



Figure 1: Définition des PMI

I-1.2. Pourquoi les PMI sont essentielles dans les pays en développement?

En Algérie, par exemple, les PMI pourraient constituer un moteur stratégique pour diversifier l'économie hors hydrocarbures, en stimulant la production locale, en renforçant les chaînes de valeur internes, et en encourageant l'innovation à petite échelle. Elles permettent également de réduire les inégalités régionales en favorisant un développement industriel déconcentré, ancré dans les réalités du territoire.

Selon la Banque mondiale, une PME (incluant les PMI industrielles) est définie comme une entreprise employant jusqu'à 300 salariés, et dont le chiffre d'affaires annuel ou les actifs ne dépassent pas 15 millions de dollars américains. De son côté, l'OCDE considère les PME comme des entités comptant moins de 250 employés, avec un chiffre d'affaires inférieur à 50 millions d'euros ou un bilan total n'excédant pas 43 millions d'euros.

Dans ce cadre, la promotion des PMI n'est pas seulement une nécessité économique, mais un choix stratégique pour favoriser une croissance inclusive, créer des écosystèmes industriels durables et renforcer la résilience des économies nationales face aux crises globales.

I-1.2. L'INDUSTRIE ALGERIENNE ET LA PLACE DES PME/PMI

L'industrie : force motrice de l'économie algérienne [2]

L'émergence des PME/PMI en Algérie remonte à la fin des années 1980. Avant cette période, leur rôle dans l'économie nationale était marginal. En 1963, l'industrie ne représentait

que 5 % du produit intérieur brut (PIB), mais ce chiffre a rapidement progressé pour atteindre 29 % en 1969. Durant la même période, la part de l'investissement industriel est passée de 23 % à 51 % de l'investissement total. En 1969, près de 45 % de cet investissement, équivalant à 13 % du PIB, était concentré dans les secteurs des hydrocarbures, de la pétrochimie, de la sidérurgie et de la mécanique. Le premier plan quadriennal (1970–1973) prévoyait un investissement total de 27,7 milliards de dinars, soit 35 % du PIB, dont 45 % alloués à l'industrie.

Depuis l'indépendance en 1962, le développement des PME/PMI s'est structuré en trois grandes phases. La première, de 1962 à 1982, a été marquée par la nationalisation progressive des entreprises, confiées à des comités de gestion après le départ des propriétaires étrangers. À partir de 1967, ces structures ont été intégrées dans des sociétés nationales. Cette période s'inscrit dans une économie planifiée orientée vers la production de biens d'équipement et de produits intermédiaires.

Le premier code d'investissement, promulgué en 1963, malgré les incitations offertes, n'a pas permis de stimuler efficacement le secteur privé. Un nouveau code a été instauré en 1966 pour donner une place plus importante au secteur privé tout en maintenant une prédominance du public dans les secteurs stratégiques. Ce dispositif a également introduit la Commission Nationale des Investissements (CNI), chargée de délivrer les agréments nécessaires aux entrepreneurs privés. Cependant, ce n'est qu'avec le premier plan quadriennal (1970–1973), suivi du second (1974–1978), que le développement des PME/PMI a été réellement amorcé, exclusivement à l'initiative du secteur public, avec pour objectif de réduire les déséquilibres régionaux. Au total, 594 PME/PMI ont été créées durant cette période.

Malgré cette dynamique, la CNI a souvent été critiquée pour sa lourdeur administrative, ce qui a conduit à sa dissolution en 1981. Les PME/PMI étaient alors perçues comme un complément au secteur public, et les dispositifs de soutien étaient largement orientés vers ce dernier. Faute de mesures incitatives, les promoteurs privés se sont surtout orientés vers le commerce et les services, des secteurs eux-mêmes pénalisés par une fiscalité lourde, une législation du travail contraignante et un commerce extérieur fermé.

La deuxième phase, de 1982 à 1988, a coïncidé avec le lancement de grandes réformes dans un contexte d'économie toujours administrée. Deux plans quinquennaux successifs (1980–1984 et 1985–1989) ont tenté de relancer le secteur privé en introduisant plusieurs

mesures : facilitation de l'accès aux équipements, autorisations globales d'importation (AGI), et un système d'importation sans paiement immédiat. Ces initiatives ont permis la réalisation de 775 projets, malgré plusieurs restrictions comme la limitation du financement bancaire à 30 % de l'investissement, un plafond d'investissement de 30 millions de dinars pour les SARL, et l'interdiction de cumuler plusieurs projets pour un même entrepreneur.

À partir de 1988, une troisième phase s'est ouverte avec un assouplissement progressif du cadre législatif, initié par la loi 88-25 du 19 juillet 1988. Cette dernière a levé les plafonds imposés aux investissements privés, élargissant les domaines d'intervention autorisés. Ce tournant a permis la montée en puissance du secteur privé, avec 19 843 PME/PMI créées. La loi 90-10 du 14 avril 1990 sur la monnaie et le crédit, suivie du décret 91-37 de février 1991 libéralisant le commerce extérieur, a permis au nombre d'entreprises privées d'atteindre 22 382 en 1992.

Dès 1993, de nouvelles mesures de soutien ont été introduites avec la promulgation d'un nouveau code de promotion de l'investissement. Ce texte visait à :

- Encourager l'investissement national et étranger,
- Garantir l'égalité de traitement entre investisseurs,
- Réduire les délais de traitement des dossiers,
- Remplacer l'agrément obligatoire par une simple déclaration d'investissement.

Ces avancées ont été consolidées par l'ordonnance 01-03 du 20 août 2001 et la loi d'orientation sur la promotion des PME/PMI (loi 01-18 du 12 décembre 2001). Elles ont instauré plusieurs dispositifs comme la simplification des procédures de création, la mise en place d'un fonds de garantie pour les prêts bancaires, la création du Conseil National de l'Investissement, et la suppression de la distinction entre investissements publics et privés.

À partir des années 2000, le secteur a connu une expansion notable. Le nombre de PME/PMI a doublé et leur densité a quadruplé. Plus de la moitié ont été créées entre 2001 et 2007, soit 212 120 entreprises. En 2010, on comptait 398 788 PME/PMI privées, contre 207 949 en 2003. À l'inverse, les entreprises publiques ont vu leur nombre baisser de 228 unités sur la même période. Le secteur de l'artisanat a également connu une croissance importante, passant de 79 850 en 2003 à 162 085 entreprises artisanales en 2009. Malgré ces progrès, la densité des PME/PMI reste relativement faible, avec une moyenne de 10 entreprises pour 1 000 habitants, loin des standards internationaux qui dépassent les 45 pour 1 000.

Tableau 1: Evolution des PME/PMI en Algérie durant 2003-2010

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Privées	207 949	225 449	245 842	269 806	293 946	392 013	408 155	606 737
Publiques	788	778	874	739	666	626	598	560
Artisans	79 850	86 732	96 072	106 222	116 347	126 887	162 085	-----
TOTAL	288 587	312 959	342 788	376 767	410 959	519 526	570 838	607 297

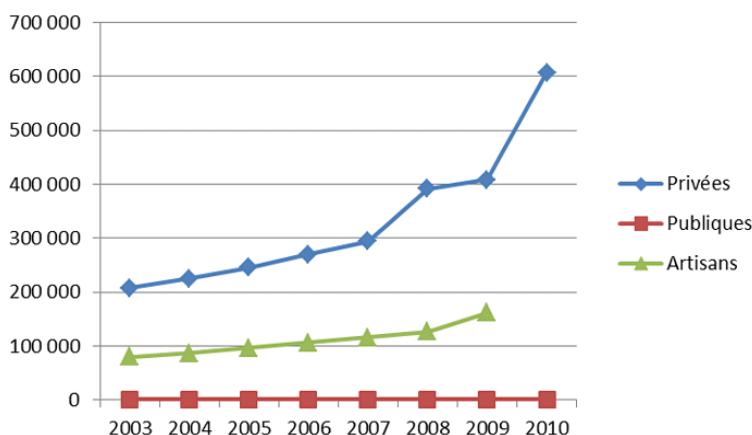


Figure 2: Schéma d'Evolution des PME/PMI en Algérie durant 2003-2010

Source : direction des systèmes d'information et des statistiques, ministère de l'industrie, de la PME et de la promotion de l'investissement.

À partir de 2010, l'Algérie a continué à mettre en œuvre des politiques de soutien aux PME/PMI, dans le but de dynamiser le tissu économique national, réduire la dépendance aux hydrocarbures, et promouvoir l'emploi. Le nombre de PME/PMI a poursuivi sa progression, soutenu par plusieurs réformes administratives, fiscales et financières. En 2012, le pays comptait environ 550 000 PME/PMI, contre un peu moins de 400 000 en 2010, traduisant un véritable engouement entrepreneurial.

Entre 2014 et 2019, malgré la crise pétrolière qui a affecté les équilibres budgétaires de l'État, les dispositifs d'aide à la création d'entreprise (ANSEJ, CNAC, ANGEM, FGAR, etc.) ont été maintenus, avec une orientation accrue vers les secteurs productifs (agroalimentaire, industrie légère, services à forte valeur ajoutée). L'État a multiplié les programmes de formation, d'accompagnement à l'innovation et d'accès au foncier industriel.

En 2017, la loi sur le développement des PME a été renforcée par un dispositif national de labellisation, la création de clusters et de technopoles, ainsi que la mise en place de centres

de facilitation pour améliorer l'environnement des affaires. La Banque Algérienne de Développement (BADR) et d'autres établissements bancaires publics ont été incités à adapter leur offre de financement aux besoins spécifiques des PME.

À partir de 2020, la pandémie de COVID-19 a représenté un choc brutal pour les petites et moyennes entreprises. De nombreuses PME, notamment dans les services, le commerce et le tourisme, ont été fortement touchées par les mesures de confinement et la baisse de la demande. L'État a mis en place des reports d'échéances fiscales et parafiscales, ainsi que des mécanismes de soutien à la trésorerie pour limiter les faillites.

Entre 2021 et 2024, l'accent a été mis sur la numérisation de l'administration, la simplification des procédures de création d'entreprise (notamment via le portail numérique de l'ANDPME), et la promotion de l'entrepreneuriat des jeunes à travers des concours d'innovation, des incubateurs et des pépinières d'entreprises. L'Algérie a également signé plusieurs accords de coopération internationale pour appuyer la formation et le transfert technologique au profit des PME.

En 2023, le ministère de l'Économie de la Connaissance a lancé un programme national de transformation numérique des PME, avec pour objectif de renforcer leur compétitivité et leur intégration dans les chaînes de valeur régionales et internationales.

Fin 2023, le pays comptait plus de 1 000 000 de PME/PMI enregistrées, un chiffre qui témoigne d'un dynamisme entrepreneurial soutenu, malgré les contraintes structurelles telles que l'accès au financement, la bureaucratie persistante et l'informalité de certaines activités économiques.

I-1.3. Importance et rôle des PME/PMI pour le développement économique algérien

Nul ne peut nier le rôle et l'importance de la PME/PMI dans toutes les économies, car elle permet et contribue à la croissance et au développement économique, par :

- La création d'emplois ;
- La création de la valeur ajoutée ;
- La participation à la distribution des revenus.
- La création d'emploi

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ces dernières années, la tendance générale du taux de chômage en Algérie s'oriente à la baisse, notamment grâce à l'apport significatif des PME/PMI dans la création d'emplois, en particulier dans le secteur privé et artisanal. À titre d'exemple, le taux de chômage a diminué de 15,3 % en 2005 à 12,3 % en 2006. Toutefois, une légère hausse de 1,5 % a été enregistrée en 2007 [3].

Cette dynamique économique est en grande partie portée par les investissements industriels. Néanmoins, elle est confrontée à plusieurs obstacles, tels que le manque de financement, des coûts de production élevés et la concentration excessive de l'industrie dans certaines régions. Pour y remédier, une stratégie efficace consisterait à encourager la création de filiales de petite taille affiliées à de grandes entreprises, en recourant notamment à la sous-traitance. Cette approche permettrait de développer un tissu industriel diversifié, capable de répondre graduellement à la demande d'emploi, en générant des postes durables à moindres coûts.

Comme de nombreux pays, l'Algérie a pris conscience du rôle stratégique des PME/PMI dans la lutte contre le chômage et a enregistré des avancées notables dans ce domaine, comme le confirment les données présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 2: Evolution des emplois/PME/PMI en Algérie durant 2004/2010

Entreprises	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Privées	225 449	245 842	269 806	293 946	392 013	408 155	606 737
Publiques	778	874	739	666	626	598	560
Artisans	86 732	96 072	106 222	116 347	126 887	162 085	-----
TOTAL	312 959	342 788	376 767	410 959	519 526	570 838	607 297

Source : direction des systèmes d'information et des statistiques, ministère de l'industrie, de la PME et de la promotion de l'investissement, 2010.

Les données du tableau mettent en évidence une progression significative des emplois créés par le secteur privé et l'artisanat, contrastant avec une baisse continue de l'emploi dans le secteur public sur la période 2004–2010. Ce recul s'explique principalement par les politiques de privatisation mises en œuvre dans le cadre de la transition vers une économie de marché.

Afin de mieux illustrer cette évolution, notamment celle des postes d'emploi générés par les PME/PMI, un graphique a été réalisé pour représenter de manière visuelle cette tendance.

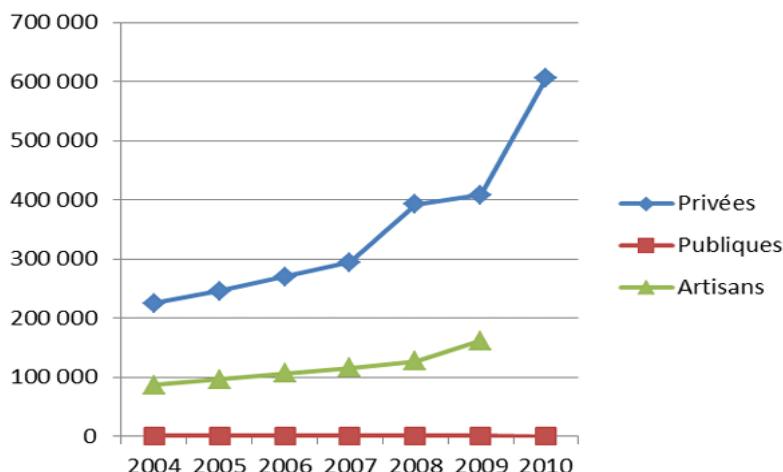


Figure 3: Schéma d'Evolution des emplois PME/PMI en Algérie durant 2004-2010

➤ La création de la valeur ajoutée

La valeur ajoutée correspond à la richesse réellement produite par une entreprise, mesurée par la différence entre le chiffre d'affaires généré par la vente de ses biens ou services et le coût des consommations intermédiaires nécessaires à cette production. En 1994, le secteur public en Algérie a généré une valeur ajoutée de 617,4 milliards de dinars, représentant 53,5 % du total national, tandis que le secteur privé contribuait à hauteur de 46,5 %, soit 540,6 milliards de dinars.

Cependant, à partir de 1998, cette tendance s'est inversée : le secteur privé a pris l'ascendant avec une contribution de 1 178 milliards de dinars (soit 53,6 % du total), contre 1 019,8 milliards de dinars pour le secteur public (46,4 %). Il est également important de souligner que, dans les pays développés, plus de 65 % de la valeur ajoutée et de l'emploi proviennent des PME/PMI. Cela met en lumière la nécessité d'adopter une politique économique axée sur la création, la promotion et la dynamisation de ce type d'entreprises pour accompagner efficacement le développement national.

➤ La distribution des revenus

Chaque PME/PMI, en produisant de la valeur ajoutée, participe à la redistribution des richesses à travers la rémunération des différents facteurs ayant contribué au processus de production. Cette valeur ajoutée permet ainsi de rémunérer le travail (salaires), le capital (dividendes, intérêts) et de contribuer au budget de l'État par le biais des impôts et taxes.

Il apparaît donc clairement que l'entreprise, quelle que soit sa taille, joue un rôle central dans l'économie nationale par sa capacité à générer et redistribuer la richesse. Mais au-delà de cette fonction purement économique, les entreprises – notamment les PME/PMI – assument aujourd'hui des responsabilités élargies à des dimensions sociales, humaines et culturelles, devenant ainsi des acteurs majeurs du développement global de la société.

En résumé Les Petites et Moyennes Industries (PMI) jouent un rôle fondamental dans le développement industriel et l'innovation technologique, malgré leur nombre restreint par rapport à l'ensemble des entreprises. Elles occupent une place stratégique au sein des chaînes de valeur industrielles en fournissant des composants essentiels et des produits finis qui alimentent à la fois les marchés nationaux et internationaux. Leur contribution au Produit Intérieur Brut (PIB) est significative, notamment dans des secteurs clés comme l'automobile, l'aéronautique et l'énergie.

En matière d'emploi, les PMI offrent des opportunités de carrière dans des domaines hautement spécialisés et techniques, favorisant ainsi le développement des compétences industrielles et la formation professionnelle. Elles participent à l'amélioration de la compétitivité et à la modernisation du secteur industriel, en proposant des emplois souvent stables et bien rémunérés, renforçant ainsi le tissu socio-économique des régions industrielles.

De plus, les PMI sont un moteur essentiel de l'innovation technologique grâce à leurs investissements dans la recherche et le développement. Elles visent à améliorer les processus de production et à créer de nouveaux produits, ce qui renforce leur position sur le marché mondial et dynamise l'ensemble de l'écosystème industriel. En favorisant les collaborations et les synergies avec d'autres entreprises, elles contribuent activement à la compétitivité du secteur industriel. Il est donc indispensable de soutenir leur croissance afin d'assurer le dynamisme et la pérennité de l'industrie à l'échelle nationale et internationale.

I-2. Généralités sur l'évolution de l'industrie (industrie1.0, industrie2.0, industrie3.0, industrie4.0)

L'histoire de l'industrialisation a été marquée par une succession de transformations majeures, parfois révolutionnaires, qui ont profondément influencé la compétitivité des économies à l'échelle mondiale. Chaque transition – de l'ère du charbon à celle de l'électricité, puis à la digitalisation et à l'automatisation des chaînes de valeur – a offert un avantage compétitif aux industries ayant su s'adapter rapidement en intégrant ces nouvelles technologies à leurs processus de production.

Ces mutations industrielles ont entraîné des impacts économiques importants, redéfinissant les équilibres de la compétitivité et remodelant les fondements de l'industrie mondiale. Cependant, le paysage industriel actuel diffère sensiblement de celui des révolutions précédentes. Il ne s'agit plus de l'émergence d'un modèle unique adopté par l'ensemble des secteurs, comme ce fut le cas avec les révolutions industrielles successives (1.0, 2.0, 3.0 puis 4.0).

Aujourd'hui, nous assistons plutôt à une convergence de plusieurs transformations simultanées, qui vont au-delà de la simple automatisation ou digitalisation. Ces bouleversements englobent des changements profonds, structurels et transversaux, qui redéfinissent les logiques de production et d'innovation dans l'ensemble du tissu industriel [4].

La figure ci-haut résume ce qui a été décrit en avant, c'est-à-dire les évolutions des révolutions du secteur industriel, allant de la première qui date de 1765 pour arriver à celle d'aujourd'hui :

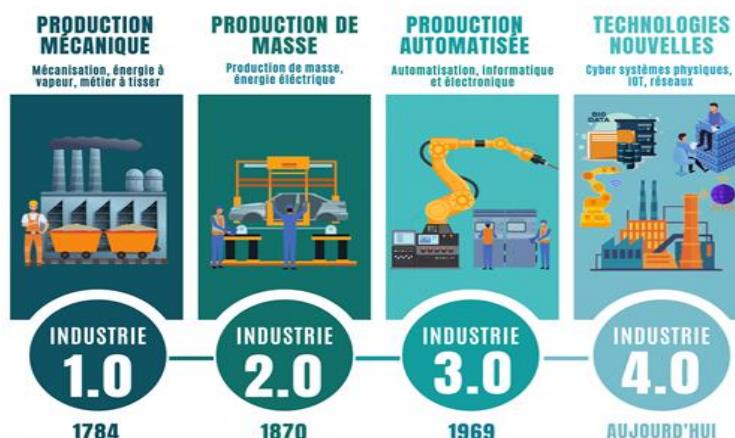


Figure 4: Les quatre révolutions industrielles

➤ L'industrie 1.0

La première révolution industrielle, survenue entre 1760 et 1820 (et jusqu'en 1840 selon certaines sources), constitue une étape déterminante dans l'histoire de l'humanité. Elle marque la transition de sociétés principalement agraires vers une ère industrielle, amorcée en Grande-Bretagne grâce à des avancées majeures dans l'utilisation du charbon et de la machine à vapeur. Ce modèle s'est rapidement diffusé dans d'autres pays comme les États-Unis, la Belgique, la France et l'Allemagne.

Cette période a été caractérisée par des innovations technologiques significatives, notamment dans le domaine des machines, des sources d'énergie, des moyens de communication et des transports. Ces progrès ont permis d'atteindre des niveaux de productivité inédits, tout en donnant naissance à de nouvelles formes d'organisation du

travail, telles que le système d'usine, qui a renforcé l'efficacité des processus de production [5].

Au-delà de ses impacts économiques, cette révolution a eu des conséquences profondes sur les structures politiques et sociales. Les gouvernements ont été contraints d'adapter leurs politiques afin de répondre aux transformations en cours, notamment par la mise en place de réformes éducatives visant à former une main-d'œuvre qualifiée, apte à répondre aux exigences de la nouvelle économie industrielle [6]. Des institutions éducatives spécialisées ont ainsi vu le jour pour accompagner ce changement.

En modifiant radicalement les modes de vie, de travail et de communication, la première révolution industrielle a ouvert la voie à une croissance économique durable et à l'émergence des sociétés industrielles modernes. Elle a également contribué à une redistribution de la richesse à une échelle sans précédent et posé les fondations du capitalisme industriel contemporain.

➤ L'industrie 2.0

La seconde révolution industrielle, survenue au XIX^e siècle, a profondément transformé l'économie mondiale, marquée par des phases alternées de croissance et de crise. Parmi les événements les plus marquants figurent la grande dépression de 1893 et le krach de 1930, qui ont eu des conséquences particulièrement graves sur les économies et les industries à l'échelle internationale. De plus, les deux conflits mondiaux ont accentué cette instabilité économique et ont fortement perturbé l'appareil industriel dans un contexte global spécifique [7].

Malgré un climat politique peu favorable, cette période a été synonyme d'avancées technologiques majeures et d'une industrialisation accélérée. L'essor de la production en série, amorcé à la fin du XIX^e siècle, a été optimisé par l'introduction de pièces standardisées et de chaînes de montage, rendant la fabrication des produits plus rapide et plus efficiente. Cette amélioration des procédés a contribué à une diminution des coûts, favorisant ainsi un meilleur accès des consommateurs aux biens de consommation. S'appuyant sur ces innovations, de nombreuses grandes entreprises ont fusionné, donnant naissance à des entités puissantes comme les fiducies et les monopoles, qui ont jeté les bases du capitalisme industriel moderne.

Parallèlement, les progrès réalisés dans les domaines des transports et des télécommunications ont permis à ces conglomérats d'élargir leur influence à l'échelle

mondiale. Ce développement a rendu nécessaire un recours accru à l'innovation et à la recherche scientifique, poussant ainsi de nombreuses firmes à créer des départements dédiés à la recherche et au développement [8].

➤ L'industrie 3.0

La troisième révolution industrielle, également connue sous le nom d'industrie 3.0, s'est construite autour des avancées majeures dans le domaine de l'électronique et de l'informatique. Dès le début des années 2000, des investissements massifs en recherche et développement (R&D) ont été engagés par les institutions militaires, les gouvernements, les universités et le secteur privé. Si ces efforts étaient initialement motivés par des objectifs de défense, leurs retombées ont rapidement trouvé des applications civiles, notamment dans la fabrication électronique, la robotique et l'Internet des objets (IoT) [9].

Ces progrès ont permis l'émergence de technologies clés telles que les transistors, les ordinateurs et les circuits programmables, qui ont ouvert la voie à l'automatisation des processus industriels complexes. Ce tournant technologique a marqué le début d'une nouvelle ère caractérisée par une efficacité accrue, une productivité renforcée et une précision sans précédent dans la fabrication.

L'automatisation rendue possible par l'industrie 3.0 a profondément transformé les chaînes de production, réduisant la dépendance à la main-d'œuvre humaine pour certaines tâches complexes. Cela a permis aux entreprises de baisser leurs coûts de production tout en améliorant la qualité et la fiabilité des produits. Cette révolution a ainsi jeté les bases d'une industrie plus intelligente, anticipant les évolutions qui mèneront plus tard à l'industrie 4.0.

➤ L'industrie 4.0

Le concept d'industrie 4.0 a été introduit pour la première fois lors de la Foire de Hanovre en 2011, à l'initiative de représentants du monde industriel, politique et scientifique allemands. Cette idée visait initialement à renforcer la compétitivité industrielle de l'Allemagne face à la montée des économies émergentes d'Asie et d'autres régions en développement. Elle a par la suite été intégrée dans la stratégie gouvernementale allemande baptisée "High-Tech Strategy 2020 for Germany", avec pour objectif de positionner le pays comme un acteur de premier plan en matière d'innovation technologique industrielle [10].

Depuis, l'industrie 4.0 a acquis une reconnaissance mondiale, bien que sa définition varie selon les contextes. Différents gouvernements, entreprises, institutions de recherche et organismes internationaux ont interprété et adapté ce concept à leurs besoins spécifiques. Ainsi, des stratégies similaires ont émergé à l'échelle mondiale. L'Inde, par exemple, a lancé le programme "Make in India" afin de stimuler son secteur manufacturier et de créer des opportunités d'emploi. La Chine, de son côté, a développé "Made in China 2025", une initiative ambitieuse visant à faire progresser ses capacités en fabrication avancée.

Plus qu'une simple numérisation de l'industrie, l'industrie 4.0 repose sur une approche systémique et intégrée, fondée sur la convergence des technologies de l'information, de la communication et de la production. Au cœur de ce paradigme se trouve le concept de "smart factory" ou "usine intelligente", un environnement de production dans lequel les machines, les systèmes et les opérateurs interagissent en temps réel pour optimiser les processus, améliorer la flexibilité et répondre aux exigences complexes et changeantes du marché.

Ces usines intelligentes s'appuient sur une architecture modulaire et sont pilotées par des systèmes cyber-physiques (CPS) capables de prendre des décisions de manière autonome. Par ailleurs, les technologies de l'Internet des Objets (IoT) facilitent la communication instantanée entre les différents éléments de la chaîne de production, tandis que les systèmes d'exploitation industriels (IOS) renforcent les services internes et inter-organisationnels tout au long de la chaîne de valeur [11].

L'industrie 4.0 s'articule autour de deux axes d'intégration :

L'industrie 4.0 repose essentiellement sur deux formes d'intégration fondamentales : «l'intégration horizontale» et «l'intégration verticale», qui ensemble forment l'épine dorsale de l'usine intelligente et connectée.

❖ L'intégration horizontale :

Cette approche vise à interconnecter l'ensemble des acteurs et des unités impliqués dans la chaîne de valeur, à travers un réseau intelligent de production et d'échange d'informations. Elle englobe la coordination entre les machines, les lignes de production, les différents sites de fabrication, ainsi que les fournisseurs et les partenaires logistiques. Grâce à une circulation fluide et transparente des données, les entreprises peuvent coopérer plus efficacement, en temps réel, sur des processus étendus de conception, de fabrication et de distribution [12].

Cette interconnexion favorise l'optimisation des ressources, la réduction des délais et une meilleure réactivité face aux fluctuations du marché.

❖ L'intégration verticale :

Elle consiste à connecter les différentes fonctions internes de l'entreprise – de la production jusqu'aux services de gestion – dans un système unifié d'échange d'informations. Cette intégration relie les systèmes de contrôle industriel (atelier) aux technologies de l'information utilisées dans les départements tels que les ventes, le marketing, la R&D, les ressources humaines, la finance ou encore la gestion de la qualité. Elle permet ainsi une circulation continue de données entre les différents niveaux hiérarchiques et fonctionnels, rendant les processus plus flexibles, cohérents et orientés vers la performance globale de l'organisation [13].

L'objectif de cette double intégration est de permettre l'émergence de « systèmes cyber-physiques intelligents », dans lesquels des objets connectés (IoT) collectent et analysent des données issues du monde réel afin d'alimenter des décisions optimisées et souvent automatisées. Ces systèmes sont capables d'interpréter leur environnement, d'anticiper des évolutions et d'adapter dynamiquement les processus industriels.

Parmi les caractéristiques essentielles de l'industrie 4.0, on retrouve :

- une production orientée vers l'intelligence et la flexibilité,
- l'interopérabilité entre machines, capteurs, systèmes et humains,
- la création de « jumeaux numériques » pour simuler et améliorer les performances,
- l'exploitation des « big data » pour des prises de décision précises,
- une transparence accrue des processus,
- l'autonomie décisionnelle des systèmes,
- un support technique robuste, et l'utilisation de « matériaux avancés », ouvrant la voie à de nouvelles possibilités de fabrication.

I-3. L'intégration de l'industrie 4.0 dans les PMI [14]

I-3.1. L'industrie 4.0

I-3.1.1. Compréhension de la genèse de l'industrie 4.0

La 4ème révolution industrielle ou en d'autres appellations l'industrie 4.0 est le sort de l'ensemble des évolutions qu'a connu le monde industriel. La première remonte à la fin du

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

18ème siècle qui, pour faciliter à l'homme la transformation de la matière, a fait recours aux machines. Puis au début du 20ème siècle, le développement de l'énergie mécanique a donné lieu à une deuxième révolution caractérisée par l'introduction des moteurs et des chaînes de montage et par l'utilisation de l'énergie électrique (ministère de l'Économie (MESI)), 2016).

Enfin, pendant les décennies 1950, 1960 et 1970, une troisième révolution, marquée par l'apparition des robots, des machines à commande numérique, des automates et des contrôleurs logiques programmables, a pris effet. Tout en favorisant la production de masse automatisée, flexible et efficiente (Drath et al., 2014). Cependant, la compétition sur les coûts au cœur de cette troisième révolution a touché à ses limites (Kohler et al., 2016). Car la demande du consommateur est toujours en augmentation avec l'exigence d'une qualité meilleure à bas prix. C'est là qu'une révolution technologique apparaîtra et tend à modifier fondamentalement notre façon de vivre, de travailler et d'établir des relations entre nous. Dans son ampleur, sa portée et sa complexité, la transformation est différente de tout ce que l'humanité a connu auparavant (Stock et Seliger, 2016), car elle doit être intégrée et globale, impliquant tous les acteurs de la politique mondiale, des secteurs public et privé ainsi que la société civile. (Schwab, 2016b). Sous différents titres, cette révolution fait l'objet de sujet d'actualité des journaux, conférences, et des médias, on parle de : l'industrie 4.0, la transformation numérique du secteur manufacturier, ou bien encore la quatrième révolution industrielle.

Le concept de l'industrie 4.0 est le résultat d'une réflexion lancée en 2011 par le gouvernement de l'Allemagne, et qui a fait l'objet des recherches dans le monde universitaire et de grands partenaires industriels du pays. La perspective la moins ambitieuse était d'augmenter et de maintenir la performance en matière de productivité et de flexibilité du secteur manufacturier allemand (ministère de l'Économie (MESI)), 2016). Également, il était question

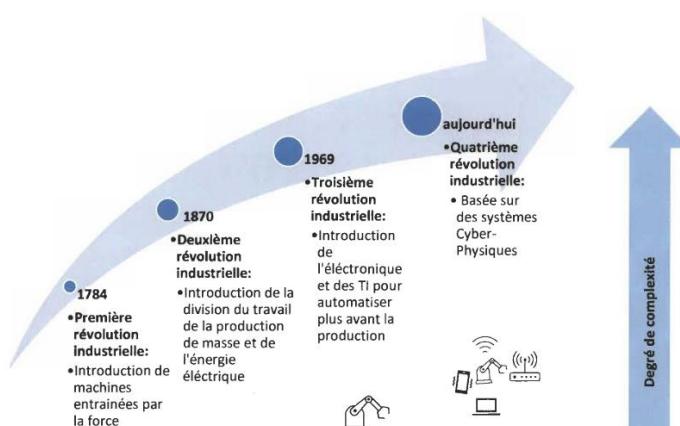


Figure 5: les quatre révolutions industrielles. Source, (ministère de l'Économie (MES!)), 2016)

de promouvoir la production intelligente par des machines et des hommes qui communiquent entre eux. Cette réflexion a, par la suite, donné naissance à un nouvel âge industriel qui, non seulement rompt avec le modèle reposant sur les oppositions entre producteur et consommateur, client et fournisseur, concepteur et usager, mais aussi vise à développer un modèle d'affaires exploitants les données issues des clients et des équipements (Kohler et Weisz, 2016; Schwab, 2016b) par l'automatisation et l'intégration de nouvelles technologies à la chaîne de valeur de l'entreprise « Ministère de l'Économie (Ministère de l'Économie (MESI)), 2016). Quoique l'industrie 4.0 est précédée par trois révolutions industrielles (comme illustrée dans la figure 4), elle se considère comme disruptive puisqu'elle vise à rendre le système manufacturier intelligent par des usines, des produits et des services aussi intelligents et connectés entre eux. Il s'agit de rendre l'ensemble des objets et des intervenants, d'une usine, interconnectés tout au long de la chaîne de valeur.

I-3.1.2. Définition de l'industrie 4.0 :

L'industrie 4.0 est un sujet d'actualité impliquant les sociétés contemporaines et les organisations et faisant l'objet des recherches dans le monde universitaire et industriel (Kagermann et al., 2013). Le terme « Industrie 4.0 » a été utilisé, pour la première fois, en 2011 dans le plan d'action stratégique allemande 2020 portant sur les nouvelles technologies (Pilloni, 2018). Bien que les écrits faisant consensus sur les principes de ladite industrie 4.0 sont nombreux, il est difficile de trouver une définition du concept « Industrie 4.0» qui fait consensus. La transdisciplinarité du concept, traduite par le vif intérêt accordé audit concept, conduit à l'émergence d'une diversité terminologique telle que « industrie future », « industrie numérique », « industrie intelligente », « internet industriel » ou « transformation numérique » (Cayrat, 2018). C'est ainsi qu'en 2013, BITCOM, l'association des télécommunications allemandes a trouvé plus de 100 définitions du concept de l'industrie 4.0 (Bidet-Mayer, 2016).

Cependant, afin de mieux cerner le sujet et limiter l'impact du changement auquel les individus, les organisations et les sociétés peuvent faire face, il est essentiel de ne citer que les définitions les plus importantes.

Par exemple, pour Schumacher (2016), «Industrie 4.0 fait référence aux avancées technologiques récentes dans lesquelles Internet et les technologies associées (par exemple, les systèmes intégrés) servent de pivot pour intégrer des objets physiques, des acteurs humains, des machines intelligentes, des lignes de production et des processus dépassant les limites

organisationnelles afin de former une nouvelle chaîne de valeur plus agile, intelligente et connectée» (Schumacher et al., 2016, p. 161).

Certains auteurs caractérisent l'industrie 4.0 par « des systèmes qui communiquent et coopèrent entre eux, mais également avec les humains, pour décentraliser la prise de décisions » (Danjou et al., 2017), tandis que d'autres chercheurs notamment le CEFRIOD met l'accent sur l'intelligence stratégique s'appuyant sur les nouvelles technologies telles que les Mégadonnées, l'infonuagique et surtout l'internet des objets (CEFRIOD, 2016). Ainsi, la définition donnée par General Electric au terme internet industriel, confirme la transdisciplinarité du concept industrie 4.0. Elle décrit l'intégration des machines, d'ordinateurs et des hommes avec des capteurs, des objets et logiciels connectés permettant la prédition, la planification et le contrôle des opérations industrielles et générant des résultats organisationnels transformationnels (Industrial Internet Consortium, 2013). On admet qu'une longue période du temps est nécessaire pour qu'un changement, une restructuration et même une révolution industrielle se développent et s'ajustent. C'est ainsi que Qin (2016) stipule que, parallèlement à la mise en œuvre du changement, la définition du concept industrie 4.0 sera raffinée et adaptée aux avancées du domaine (Qin et al., 2016).

Et en effet, pour Blanchet (2016), c'est un nouveau paradigme qui consiste à insérer ces technologies dans les industries. Les entreprises sont amenées à investir pour intégrer les nouvelles technologies de l'information, automatiser les processus par la robotique, les systèmes cyber physique et les systèmes embarqués et pour rendre les chaînes d'approvisionnement coordonnées (Blanchet, 2016). Ce paradigme va de l'optimisation des actifs physiques jusqu'à l'optimisation de la façon dont les données et les informations sont exploitées tout au long du cycle de vie du produit. Cette optimisation numérique s'appuie sur un flux d'informations, représenté par un « fil numérique », qui couvre tout le cycle de vie du produit. Ce fil numérique commence de la conception numérique du produit, passe par le processus de fabrication piloté et contrôlé numériquement, conduit à la surveillance numérique du produit final en fonctionnement (à des fins de maintenance), et se termine finalement par le recyclage du produit à raide des informations stockées numériquement et qui permet d'identifier les pièces à réutiliser (McKinsey & Company, 2015). En effet, Berger (2016) explique qu'à chacune de ces étapes, le format numérique de l'information fonctionne comme un facilitateur : les données peuvent être facilement échangées, le processus peut être visualisé et contrôlé via des interfaces (outils numériques tels que les tablettes, appareils intelligents.), et une interaction peut être réalisée à l'intermédiaire de Systèmes Cyber-Physique (SCP). En outre, l'exploitation et le partage

d'informations par l'entremise de ces systèmes et de l'internet des objets (IdO) permettront une intégration transversale plus poussée et une coopération plus étroite tout au long du cycle de vie du produit, même au cours des différentes étapes impliquant différents fournisseurs ou clients (Berger, 2016). L'objectif est d'optimiser les systèmes de l'environnement manufacturier en utilisant des machines autonomes et intelligentes qui en échangeant de l'information peuvent de manière indépendante prendre des décisions et s'autocontrôler (Kagermann et al., 2013).

Ainsi, l'optimisation de l'écosystème manufacturier consiste donc à une meilleure utilisation de l'information. Les technologies de l'industrie 4.0 sont conformes en ce qu'elles offrent des moyens tels que des dispositifs et capteurs intelligents et connectés pour mieux utiliser les données afin d'optimiser la productivité et l'efficience (preuveneers et al., 2017). Par exemple, l'analyse avancée transforme les informations en résultats qui aident les décideurs et l'impression 3D à convertir les données numériques en une pièce tangible et les informations capturées à planifier le temps idéal de maintenance. Autrement dit, la clé pour saisir les nouvelles opportunités et pour booster la performance est de gérer activement les informations le long de la chaîne de valeur afin d'éviter les fuites d'informations (preuveneers et ilie-Zudor, 2017). Ces fuites sont des points dans les processus où l'information est perdue, qui est peut-être utile pour une partie prenante dans la chaîne de valeur.

Aussi, les machines et les biens constituent une catégorie de coûts importante pour les entreprises manufacturières; par conséquent, l'utilisation optimale des capteurs d'informations et des dispositifs intelligents et connectés aura un effet considérable sur l'optimisation de la productivité, de la gestion du cycle de vie et du design organisationnel (Zhong et al., 2017). Comme décrit ci-dessus, les technologies de l'industrie 4.0 utilisent donc l'information pour capturer ce potentiel de valeur.

L'introduction de la surveillance et de la direction à distance pour réduire le temps d'arrêt, en utilisant au mieux toutes les informations sur la machine, peut améliorer l'utilisation des actifs et ainsi générer de la valeur (Mckinsey & Company, 2015) .

Afin d'identifier et de prioriser les opportunités le long du fil numérique, le McKinsey Digital Compass a développé huit facteurs de valeur qui ont un impact significatif sur la performance d'une entreprise manufacturière typique (Figure 5). Pour chacun de ces facteurs de valeur, il existe des outils de l'industrie 4.0 qui mènent généralement à des améliorations. La figure relie les outils les plus importants aux huit indicateurs de la valeur, ce qui permet aux entreprises de se doter d'un cadre pour identifier systématiquement les potentiels de l'industrie 4.0:

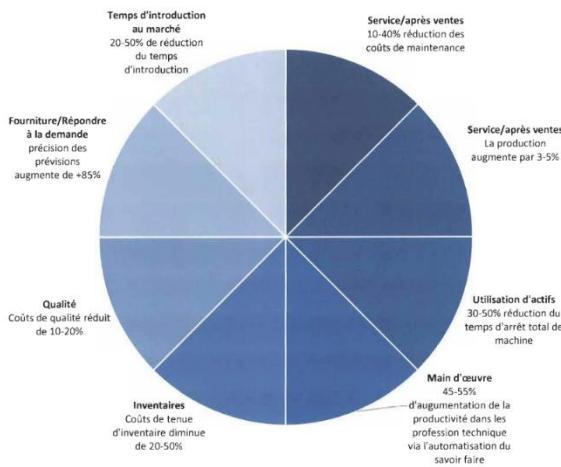


Figure 6: Poids des facteurs de valeur

Selon Wang, (2016), l'industrie 4.0 permet ainsi d'intégrer l'ensemble de la chaîne de valeur sur 3 axes :

- **Intégration horizontale** : Sur le centre opérationnel, les hommes et les machines communiquent, en temps réel, tout au long de la chaîne de valeur. Les entreprises connectées entre elles peuvent constituer un écosystème efficace permettant l'émergence des réseaux et des partenariats industriels (Song et al., 2014).
- **Intégration verticale** : permet la mise en place de systèmes et sous système de fabrication flexible et qui communiquent entre eux. Grâce à cette intégration, les machines intelligentes forment un système autoorganisé qui peut être reconfiguré de manière dynamique pour s'adapter à différents types de produits (Wang et al., 2016).

- **Intégration en temps réel** : au long du processus de création de valeur, les objets et systèmes connectés collectent et enregistrent les informations relatives au développement et à la conception du produit, la production dudit produit et son utilisation afin de créer des produits personnalisés (Wang et al, 2016).

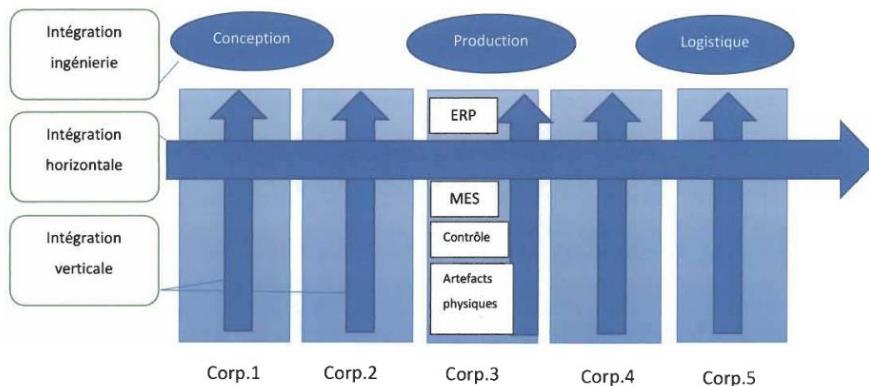


Figure 7: Illustration des axes d'Intégration et leurs relations

Selon cette analyse, l'industrie 4.0 semble changer le modèle industriel en favorisant le potentiel de réduction des coûts de complexité en permettant aux entreprises de mieux utiliser leur valeur.

En effet, ce nouveau paradigme provoqué par les nouvelles technologies constitue un renversement de la production traditionnel, car les machines ne conçoivent pas uniquement des produits, mais également des produits intelligents qui communiquent avec des machines afin de transmettre les informations dont elles ont besoin (Germany Trade et Invest, 2014).

Par conséquent, l'objectif principal d'Industrie 4.0 est d'accroître la qualité du produit en optimisant les processus de production pertinents afin d'améliorer les rétroactions des clients, d'améliorer la flexibilité, la rapidité, la qualité et la productivité (Karre et al, 2017).

En conclusion, l'Industrie 4.0 fait référence aux nouvelles technologies numériques dont il est important de définir.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'importance stratégique des PMI dans le développement économique, en particulier dans les pays émergents comme l'Algérie. À travers une analyse des évolutions industrielles, il a été montré que l'industrie 4.0 représente une rupture technologique majeure, fondée sur l'interconnexion des systèmes et l'intégration de technologies avancées telles que l'IA, l'IoT et le Big Data.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'intégration de ces innovations dans les PMI constitue à la fois une opportunité de modernisation et un défi en termes de ressources, de compétences et d'organisation. Ainsi, une transition réussie vers l'industrie 4.0 nécessite un accompagnement stratégique, des politiques publiques ciblées et une dynamique d'innovation soutenue.

Chapitre 2 : La fabrication intelligente dans les PMI

Introduction

À l'ère de l'industrie 4.0, l'intelligence artificielle (IA) joue un rôle central dans la transformation des systèmes de production. Initialement réservée aux grands groupes industriels, elle s'impose progressivement comme une technologie accessible et stratégique pour les Petites et Moyennes Industries (PMI), leur permettant de moderniser leurs outils de production, de gagner en efficacité, et de rester compétitives sur un marché de plus en plus exigeant.

Dans le domaine de la fabrication, l'IA offre des perspectives considérables : analyse prédictive, contrôle qualité automatisé, optimisation des paramètres de production, ou encore prise de décision autonome. Ces applications permettent de renforcer la performance industrielle, d'améliorer la traçabilité, et de s'adapter en temps réel aux aléas de la production.

Pour les PMI, l'optimisation des procédés de fabrication via l'intelligence artificielle représente un levier d'amélioration continue, alliant flexibilité, précision et réduction des coûts. Loin de remplacer l'humain, l'IA vient compléter l'expertise des opérateurs et faciliter la prise de décision à différents niveaux de l'atelier.

Par ailleurs, la mise en place de plateformes de maintenance intelligente constitue un autre champ d'application concret de l'IA dans les PMI. En exploitant les données issues des équipements, ces plateformes permettent d'anticiper les pannes, de réduire les temps d'arrêt, et de prolonger la durée de vie des actifs industriels, contribuant ainsi à une meilleure maîtrise des coûts et à une productivité durable.

Ce chapitre propose ainsi d'explorer successivement :

- Le rôle de l'intelligence artificielle dans la fabrication,
- Ses apports pour l'optimisation des procédés dans les PMI,
- Le fonctionnement et les bénéfices des plateformes de maintenance intelligente.

II-1. L'intelligente artificiel dans la fabrication [15]



Figure 8: L'intelligente artificiel (IA)

II-1.1. Définition

L'origine de l'intelligence artificielle (IA) remonte à 1956, lors de la conférence de Dartmouth College, initiée par John McCarthy, considéré comme l'un des pères fondateurs du domaine. L'objectif initial était de reproduire les capacités cognitives humaines à travers des machines. Des jalons importants ont jalonné cette évolution, notamment le Test de Turing proposé en 1950, qui visait à évaluer la capacité d'une machine à imiter le comportement humain, ou encore ELIZA, développé en 1965 par Joseph Weizenbaum, considéré comme l'un des premiers chatbots, illustrant les prémisses de l'interaction homme-machine.

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle représente une technologie transversale et disruptive qui transforme en profondeur notre société et nos systèmes productifs. Elle se caractérise par sa capacité à analyser et apprendre à partir de volumes massifs de données (big data), en utilisant des algorithmes avancés d'apprentissage automatique (machine learning) et d'apprentissage profond (deep learning).

Selon une étude de PwC (PricewaterhouseCoopers), l'IA pourrait ajouter jusqu'à 15,7 billions de dollars à l'économie mondiale d'ici 2030, en raison de ses applications croissantes dans des domaines aussi variés que la santé, la finance, l'industrie automobile, le droit, ou encore la logistique. Elle constitue ainsi un levier majeur de transformation numérique pour les entreprises, les gouvernements et les citoyens.

II-1.2. Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?

L'intelligence artificielle est une discipline scientifique qui se concentre sur la création de machines capables de réaliser des tâches nécessitant une forme d'intelligence humaine. Elle est définie par Marvin Minsky comme étant « la science qui consiste à faire faire aux machines des choses qui nécessiteraient de l'intelligence si elles étaient réalisées par des hommes ».

L'IA repose sur des formules mathématiques et des algorithmes utilisant les probabilités et les statistiques pour imiter des fonctions cognitives telles que l'apprentissage et la prise de décision.

Elle se divise principalement en deux branches : **le Machine Learning et le Deep Learning**. Le Machine Learning permet aux machines d'apprendre à partir de données et d'améliorer leurs performances. Le Deep Learning s'inspire du fonctionnement du cerveau humain à travers des réseaux de neurones artificiels pour traiter et interpréter des quantités massives d'informations. Ces technologies ont des applications variées, améliorant les diagnostics médicaux, la sécurité financière et les opérations commerciales numériques.

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui vise à développer des systèmes capables d'accomplir des tâches habituellement réservées à l'intelligence humaine. Ces tâches incluent l'apprentissage automatique, la reconnaissance de motifs, la prise de décision et la résolution de problèmes complexes. En s'appuyant sur des algorithmes et des modèles basés sur l'analyse des données, l'IA est en mesure d'extraire des informations, de tirer des conclusions et, dans certains cas, d'agir de manière autonome.

Dans le secteur industriel, l'IA joue un rôle essentiel. Elle permet d'optimiser les processus de production, d'améliorer l'efficacité opérationnelle et d'anticiper les anomalies avant qu'elles ne surviennent. Grâce à des technologies avancées comme le machine learning et l'analyse prédictive, les entreprises peuvent transformer leurs opérations en systèmes intelligents, capables de s'adapter en temps réel aux évolutions du marché et aux conditions fluctuantes.

Loin de se limiter à l'automatisation des tâches simples, l'IA offre également la possibilité de traiter d'importants volumes de données, d'identifier des tendances cachées et de proposer des solutions sur mesure pour les entreprises. En définitive, elle représente un moteur d'innovation majeur, modifiant en profondeur le paysage industriel et rendant les processus plus intelligents, réactifs et performants.

II-1.3 Les 7 types d'intelligence artificielle

Les formes d'intelligence artificielle peuvent être regroupées selon deux axes de classification principaux : leur niveau de capacité cognitive et leur fonctionnalité. Cette taxonomie permet de mieux comprendre le degré de maturité des systèmes d'IA existants et ceux encore en développement. Actuellement, seules certaines formes sont opérationnelles, tandis que d'autres restent purement théoriques, mais font l'objet de recherches avancées.

❖ Classification selon les capacités

Cette typologie repose sur la puissance cognitive des systèmes d'IA et leur aptitude à simuler l'intelligence humaine :

a) L'intelligence artificielle étroite (IA faible)

L'IA étroite, ou faible, représente l'état actuel de la majorité des systèmes déployés. Elle est conçue pour accomplir une tâche spécifique (reconnaissance faciale, recommandation de contenu, conduite autonome, etc.) avec une grande efficacité, mais sans conscience ni compréhension globale du monde. Ces systèmes n'apprennent que dans des domaines restreints et requièrent une supervision humaine pour être entraînés. Des exemples typiques incluent Siri, Alexa ou encore les systèmes de détection de fraude bancaire.

b) L'intelligence artificielle générale (AGI ou IA forte)

L'IA générale est une forme hypothétique d'intelligence artificielle qui aurait la capacité de comprendre, d'apprendre et de s'adapter à toute tâche intellectuelle humaine, sans intervention humaine spécifique. Elle disposerait d'un raisonnement transversal, capable de tirer parti d'expériences passées pour aborder de nouvelles situations. L'AGI demeure, à ce jour, inexistante, bien qu'elle soit un objectif majeur pour la recherche en IA.

c) La super-intelligence artificielle (Super IA)

La super IA est le niveau d'intelligence ultime, encore purement théorique, qui dépasserait largement les capacités humaines dans tous les domaines, y compris la créativité, l'émotion, le jugement et l'autonomie morale. Une telle IA serait capable d'éprouver des sentiments, de développer des objectifs personnels et de prendre des décisions de manière totalement indépendante. Elle soulève des enjeux éthiques et philosophiques majeurs.

❖ Classification selon les fonctionnalités

Cette seconde typologie distingue l'IA selon la manière dont elle traite l'information, interagit avec son environnement, et évolue dans le temps.

d) L'intelligence artificielle réactive

Il s'agit de la forme la plus élémentaire d'intelligence artificielle. L'IA réactive ne possède aucune mémoire des événements passés et réagit uniquement à des stimuli en temps réel. Elle se base sur des règles prédéfinies et des algorithmes pour fournir une réponse immédiate. Le célèbre programme Deep Blue d'IBM, qui a battu le champion du monde d'échecs Garry Kasparov en 1997, illustre ce type d'IA.

e) L'IA à mémoire limitée

Cette forme d'IA peut se souvenir temporairement d'expériences passées afin d'ajuster ses décisions futures. Elle est largement utilisée dans les systèmes actuels, notamment dans les voitures autonomes, les assistants vocaux ou les modèles de langage génératifs comme les chatbots. Elle s'améliore progressivement par l'entraînement et l'analyse contextuelle.

f) L'IA fondée sur la théorie de l'esprit

Encore en phase de recherche, cette IA vise à comprendre les intentions, les émotions, les croyances et les désirs des êtres humains. Elle ambitionne de personnaliser les interactions homme-machine en fonction de l'état émotionnel des utilisateurs. Le développement de cette capacité nécessiterait l'intégration de signaux complexes, comme les expressions faciales, le ton de la voix, ou les gestes.

g) L'IA consciente d'elle-même

Il s'agit de la forme la plus avancée et la plus spéculative de l'intelligence artificielle. Une IA consciente aurait la capacité de s'autoévaluer, de percevoir ses propres états internes, et de développer une conscience de soi. Elle serait alors en mesure de formuler des pensées indépendantes, d'avoir des émotions propres et de prendre des décisions motivées par ses propres intérêts. Cette forme d'IA, encore hors de portée scientifique, soulève des questions existentielles sur la relation entre l'homme et la machine.

II-1.4. Les grands domaines de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle se divise en plusieurs domaines clés qui structurent ses applications actuelles. Parmi eux, l'apprentissage automatique (ou Machine Learning) permet aux machines d'apprendre à partir de données pour prendre des décisions ou faire des prédictions sans être explicitement programmées. Le Deep Learning, sous-domaine de ce dernier, repose sur des réseaux de neurones profonds et permet des avancées majeures dans la reconnaissance d'images, de la parole ou du texte. L'IA symbolique, quant à elle, s'appuie sur la logique et des règles explicites pour simuler le raisonnement humain, comme dans les systèmes experts. D'autres branches fondamentales incluent le traitement automatique du langage naturel (TALN), qui permet aux machines de comprendre et de générer du langage humain, et la vision par ordinateur, qui leur offre la capacité d'interpréter des images ou des vidéos. Ces différentes spécialités, complémentaires, ouvrent la voie à une large gamme

d'applications dans des domaines variés, allant de la santé à la robotique en passant par l'industrie ou les services.

II-1.5. Intelligence artificielle (IA) dans le secteur de la fabrication



Figure 9: L'intelligence artificielle (IA) dans la fabrication

Dans le domaine de la fabrication, l'intelligence artificielle révolutionne les méthodes de production en automatisant les processus, en optimisant les chaînes d'approvisionnement et en facilitant la prise de décisions basées sur l'analyse de données. Grâce à ces avancées, les entreprises améliorent significativement leur productivité, leur qualité et leur efficacité opérationnelle.

Les installations industrielles intègrent de plus en plus des technologies basées sur l'IA pour automatiser les tâches répétitives et optimiser les flux de travail. En exploitant des algorithmes d'apprentissage automatique et des systèmes d'analyse en temps réel, elles sont capables de collecter, traiter et interpréter d'énormes volumes de données. Cette approche permet d'anticiper les défaillances, d'optimiser la gestion des ressources et d'accroître le rendement tout en minimisant les erreurs et les temps d'arrêt.

De plus, l'IA favorise l'interconnexion entre les différents équipements de production à travers l'Internet des objets (IoT), créant ainsi des usines intelligentes où chaque machine communique et s'adapte dynamiquement aux exigences de production. Cette transformation réduit la dépendance à l'intervention humaine, libérant ainsi les travailleurs pour des tâches à plus forte valeur ajoutée, comme l'innovation et l'amélioration des processus industriels.

En somme, l'intelligence artificielle ne se limite pas à une simple automatisation des tâches, mais agit comme un véritable levier stratégique qui façonne l'avenir du secteur manufacturier en le rendant plus agile, plus compétitif et plus durable.

II-1.6. Qu'est-ce que l'IA dans le secteur de la fabrication?

Dans l'industrie manufacturière, l'intelligence artificielle s'appuie sur des technologies telles que le Machine Learning et le Deep Learning pour traiter de vastes volumes de données hétérogènes. Ces technologies permettent d'identifier des modèles pertinents à partir des données collectées et d'en extraire des enseignements utiles pour améliorer les performances industrielles. L'IA devient ainsi un levier puissant pour automatiser certaines fonctions, exécuter des tâches complexes ou encore générer des recommandations stratégiques à destination des responsables de production.

Parmi les usages les plus répandus de l'IA dans ce domaine, on retrouve l'automatisation des processus en atelier, la planification intelligente des ressources, le suivi en temps réel des opérations, ainsi que l'amélioration continue de la qualité et des performances. Elle est également utilisée pour optimiser les chaînes logistiques et faciliter la prise de décision grâce à une meilleure exploitation des données disponibles.

II-1.7. Les avantages de l'IA pour l'industrie manufacturière [17]

L'apparition d'outils d'intelligence artificielle grand public, comme ChatGPT ou les générateurs d'images automatisés, a suscité un vif intérêt pour cette technologie au sein du grand public. Cette visibilité soudaine donne l'impression que l'IA est une innovation récente aux applications inédites pour les consommateurs.

Cependant, bien avant cette médiatisation, l'intelligence artificielle faisait déjà l'objet de développements et d'applications concrètes dans le secteur industriel, notamment dans la fabrication. Depuis plusieurs décennies, les entreprises manufacturières intègrent progressivement des solutions d'IA pour renforcer l'efficacité de leurs processus, soutenir les opérateurs humains, et anticiper divers scénarios à l'aide de données avancées.

Aujourd'hui, les progrès dans ce domaine sont fulgurants. L'IA permet non seulement d'optimiser les chaînes de production, mais aussi d'augmenter les capacités d'analyse, d'améliorer la prise de décision et de prévoir les performances futures. D'après une étude menée par Deloitte, 93 % des professionnels interrogés dans le secteur estiment que l'intelligence artificielle jouera un rôle déterminant dans la croissance industrielle à venir.

Dans ce contexte, il est pertinent d'examiner plus en détail quelques cas d'usage concrets illustrant les bénéfices actuels de l'IA dans l'industrie manufacturière.

10 exemples passionnants et révolutionnaires d'IA dans la fabrication

01. Exemple n° 1 d'IA dans la fabrication : collaboration entre les robots et les humains

Depuis la troisième révolution industrielle, qui a vu l'émergence de l'automatisation, les robots ont généralement été relégués à l'exécution de tâches répétitives avec une efficacité extrême. Le problème est que ces robots ont souvent été éloignés des personnes, enfermés derrière des barrières ou des enceintes en verre. Et il y a une bonne raison à cette séparation. Étant donné que le robot ou la machine suivait généralement un processus strict avec peu de conscience de soi, les humains et les robots étaient des partenaires improbables.



Figure 10: Collaboration entre les robots et les humains

Grâce aux avancées de l'intelligence artificielle, les robots industriels ont franchi une étape majeure en s'intégrant dans des environnements de travail collaboratifs.

Les **robots collaboratifs**, appelés **cobots**, sont conçus pour coopérer avec les opérateurs humains dans l'exécution de diverses tâches de production telles que l'assemblage, le vissage, le ponçage ou le polissage, avec une grande précision. Contrairement aux anciens robots confinés derrière des barrières de sécurité, les cobots sont capables d'évoluer dans le même espace que les humains, en toute sécurité.

Les apports des cobots dotés d'IA à l'industrie sont multiples :

- **Flexibilité et adaptabilité** : Grâce à l'apprentissage automatique, les cobots peuvent exécuter un large éventail de tâches et s'adapter facilement aux changements de production. Ils sont reconfigurables rapidement, ce qui les rend idéaux pour des environnements industriels en constante évolution.

- **Interaction sécurisée avec les humains** : Dotés de capteurs intelligents, les cobots peuvent détecter les mouvements humains et ajuster leur comportement en conséquence. Cela permet une coopération fluide et sécurisée dans les espaces partagés.
- **Réduction des coûts et gain d'espace** : Contrairement aux robots traditionnels qui nécessitent un espace isolé, les cobots s'intègrent directement sur les lignes de production existantes. Cela permet d'optimiser l'aménagement des ateliers et de diminuer les investissements en infrastructures.

Cette synergie entre opérateurs et systèmes intelligents renforce l'efficacité globale, tout en libérant les travailleurs des tâches répétitives pour les recentrer sur des missions à forte valeur ajoutée telles que l'innovation, l'analyse ou la supervision technique.

02. Exemple n° 2 d'IA dans la fabrication : Analyse avancée et intelligente des données

L'un des atouts majeurs de l'intelligence artificielle dans le secteur industriel réside dans sa capacité à analyser rapidement des volumes massifs de données, en s'appuyant sur des techniques de Machine Learning et de Deep Learning. Dans le contexte actuel de la fabrication, où les flux de données sont immenses et constants, cette compétence est devenue essentielle.

À titre d'exemple, le secteur manufacturier aux États-Unis génère chaque année environ 1 812 pétaoctets de données, un volume supérieur à celui de n'importe quel autre domaine d'activité. En comparaison, le secteur suivant en produit à peine la moitié. Si cette abondance d'informations représente une richesse pour l'industrie, elle peut aussi devenir un fardeau sans outils adaptés pour l'exploiter efficacement.

C'est ici que l'IA intervient : les solutions d'analyse intelligente transforment ces données brutes en informations pertinentes et exploitables, apportant de nombreux bénéfices :

- ❖ **Traitements en temps réel** : Les algorithmes d'IA permettent de traiter instantanément les données issues des processus de production, favorisant ainsi des décisions rapides et précises, basées sur des informations à jour.
- ❖ **Analyse automatisée** : L'intelligence artificielle remplace le recours aux feuilles de calcul complexes et à la saisie manuelle. Elle permet une analyse automatique des données, libérant ainsi du temps aux équipes pour se concentrer sur la stratégie et l'action.

- ❖ **Interopérabilité des systèmes :** En facilitant l'échange d'informations entre capteurs IoT, logiciels industriels et opérateurs, l'IA renforce la cohérence des systèmes. Elle contribue à la mise en place d'un jumeau numérique fluide, qui connecte les différents éléments de l'environnement de production.

03. Exemple n° 3 d'IA dans la fabrication : Amélioration de la communication grâce à l'IA de traduction

Une bonne communication est une priorité pour toute entreprise manufacturière. Si la normalisation et d'autres méthodologies allégées contribuent toutes à éléver le niveau de communication au sein d'une entreprise, il existe un dernier obstacle qui a été extrêmement difficile à surmonter : la barrière de la langue.

Pour les entreprises et les chaînes d'approvisionnement qui s'étendent à travers le monde, la communication et la normalisation des méthodes peuvent demander beaucoup de travail. Comment pouvez-vous normaliser les processus à l'échelle mondiale si vos installations parlent des langues différentes ?

Les progrès de la technologie de traduction par IA ont permis aux entreprises de partager leurs connaissances avec leurs autres sites, leurs fournisseurs et leurs clients, quelle que soit la langue. Cette IA de traduction s'appuie sur des réseaux neuronaux d'apprentissage profond pour analyser et reconnaître des modèles à partir de plusieurs langues, ce qui permet aux entreprises de communiquer des normes de manière efficace.

En exploitant les outils de traduction de l'IA, notre logiciel d'instructions de travail permet aux entreprises de traduire instantanément leurs instructions normalisées. Cette capacité signifie que les usines américaines peuvent normaliser leurs meilleures pratiques et les partager avec d'autres installations dans des endroits comme l'Allemagne ou l'Inde, en veillant à ce que les meilleures pratiques soient suivies de manière cohérente dans le monde entier.

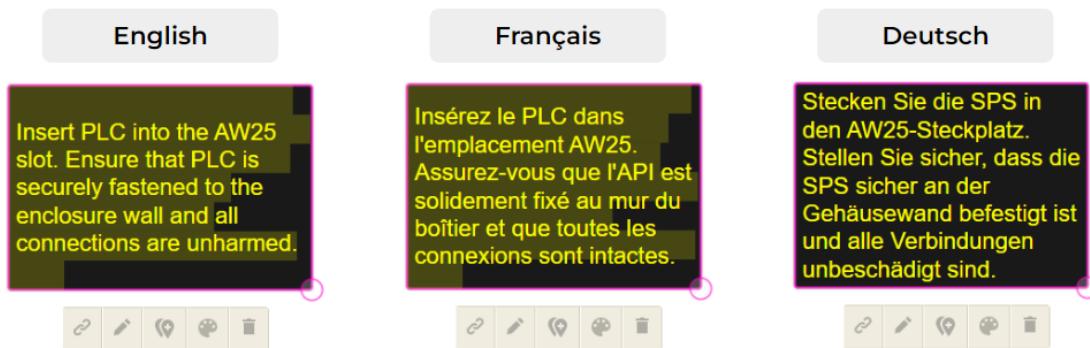


Figure 11: Amélioration de la communication grâce à l'IA de traduction

Étant donné que la longueur d'un texte varie en fonction de la langue, VKS s'appuie sur des outils de traduction IA pour afficher automatiquement la longueur du texte traduit le plus long. Le texte traduit le plus long est représenté par les barres jaunes situées derrière le texte original. Dans l'exemple ci-dessous, le texte allemand est le plus long et ne nécessite aucune représentation.

04. Exemple n° 4 d'IA dans la fabrication : des jumeaux numériques imitent et résolvent des événements de fabrication en direct

Le concept de jumeau numérique remonte à la mission Apollo 13 en 1970. Pour gérer les pannes rencontrées dans l'espace, la NASA avait reproduit une version physique du vaisseau sur Terre afin de simuler et résoudre les problèmes à distance. Aujourd'hui, cette idée a évolué grâce au numérique : les jumeaux numériques sont des répliques virtuelles, économiques et puissantes, de systèmes physiques réels.

Grâce à l'Internet des objets (IoT), chaque événement ou donnée générée dans le monde réel est simultanément reflété dans l'environnement numérique. L'ajout de l'intelligence artificielle renforce encore cet outil, le transformant en acteur autonome capable d'anticiper, d'intervenir et d'optimiser les opérations industrielles.

Par exemple, un moteur électrique équipé de capteurs connectés peut enregistrer des paramètres comme la température, les vibrations, la vitesse de rotation ou les heures d'utilisation. Ces données sont ensuite analysées par un système IA capable de tirer des enseignements et d'agir en conséquence.

Les principales capacités des jumeaux numériques dopés à l'IA incluent :

- ✓ **Détection immédiate d'anomalies :** Les algorithmes d'IA exploitent les données en continu pour repérer instantanément les écarts de fonctionnement, réduisant ainsi les arrêts imprévus et les pertes de production.
- ✓ **Analyse prédictive et proactive :** En identifiant des tendances ou signes avant-coureurs, l'IA anticipe les défaillances potentielles. Cela permet aux entreprises de passer à une maintenance préventive, plus efficace et moins coûteuse.
- ✓ **Prise de décision autonome et adaptative :** Grâce à l'intelligence artificielle, les jumeaux numériques ajustent dynamiquement leur comportement en fonction de variables telles que la consommation d'énergie, l'état des machines ou les priorités de production.
- ✓ **Simulation numérique avancée :** Ces modèles virtuels peuvent simuler différents scénarios industriels dans un environnement sécurisé, sans perturber la production réelle. Cela aide les décideurs à tester et à optimiser leurs stratégies avant leur mise en œuvre.

05. Exemple n° 5 d'IA dans la fabrication : Maintenance prédictive

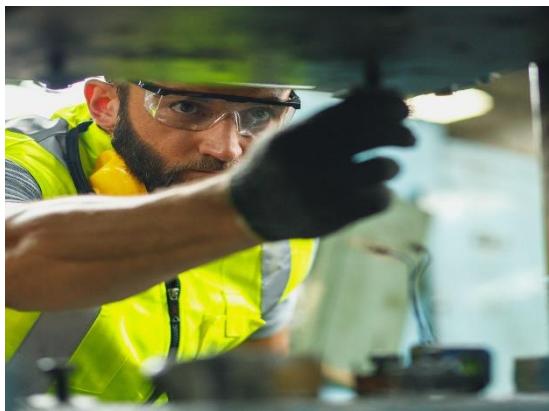


Figure 12: Maintenance prédictive

Un exemple clé de l'IA dans la fabrication au cours des dernières années a été la maintenance prédictive, qui surveille activement l'utilisation de la machine pour déterminer le besoin de service et/ou de maintenance de la machine.

Par le passé, la maintenance régulière était essentiellement préventive, c'est-à-dire qu'une machine subissait des temps d'arrêt planifiés à intervalles réguliers. Cela permet de s'assurer que les machines sont toujours utilisables en toute sécurité et qu'elles ne sont pas exposées à une usure importante.

Le problème est que ce processus est intrinsèquement un gaspillage, car la machine n'a pas forcément besoin d'être entretenue au moment prévu. De plus, les équipes de maintenance

se rendent sur place à l'aveuglette, sans disposer de données de diagnostic. Ces deux facteurs contribuent à augmenter la durée et la fréquence des arrêts planifiés.

Cependant, grâce aux capteurs IoT et à l'apprentissage automatique, les systèmes de maintenance prédictive alimentés par l'IA peuvent surveiller la santé des machines en temps réel, ce qui permet aux équipes de maintenance de savoir exactement quand les machines doivent être entretenues et quelles pièces doivent être remplacées. La connaissance de ces deux facteurs permet aux fabricants de connaître moins de temps d'arrêt et d'économiser de l'argent.

06. Exemple n° 6 d'IA dans la fabrication : les systèmes cyber-physiques facilitent le contrôle de la qualité

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les processus de contrôle qualité transforme en profondeur la manière dont les défauts sont identifiés, analysés et corrigés en milieu industriel. En combinant objets autonomes intelligents (AuT), systèmes cyber-physiques et expertise humaine, les industriels peuvent atteindre une détection des défauts d'une précision et d'une constance remarquables.

Le point de départ reste les opérateurs humains, accompagnés de logiciels intelligents qui standardisent les instructions d'inspection. Cela permet, par exemple, de réduire jusqu'à 75 % le temps nécessaire aux contrôles, tout en renforçant la rigueur du processus.

Les inspecteurs sont ainsi assistés par plusieurs outils et systèmes basés sur l'IA :

- ✓ **Vision industrielle augmentée :** Grâce à la vision par ordinateur et au traitement d'images, les systèmes IA couplés aux robots peuvent identifier des défauts invisibles à l'œil nu : rayures, pièces mal vissées, malformations, etc.
- ✓ **Analyse des causes racines :** En s'appuyant sur une traçabilité fine tout au long de la chaîne de production, l'IA est capable d'identifier l'origine exacte d'un défaut, facilitant ainsi des interventions rapides et ciblées.
- ✓ **Contrôle statistique des procédés (SPC) :** À l'aide d'algorithmes de machine learning, l'IA détecte des variations statistiques pouvant impacter la qualité. Ces données sont ensuite traduites en graphiques SPC dynamiques, permettant aux responsables de production d'anticiper les dérives.
- ✓ **Tri intelligent des anomalies :** Les systèmes IA peuvent non seulement repérer les unités défectueuses, mais aussi les classer par type et niveau de gravité. Ils évaluent en

temps réel si un produit peut être réparé ou doit être écarté, en tenant compte des impératifs économiques et logistiques.

Grâce à ces innovations, le contrôle qualité devient proactif, intelligent et efficient, offrant aux industriels un avantage concurrentiel considérable en termes de coût, de productivité et de satisfaction client.

07. Exemple n° 7 d'IA dans la fabrication : Gestion des stocks et des entrepôts

Dans l'industrie manufacturière, l'intelligence artificielle ne se limite pas à la phase de production. Elle joue également un rôle central dans la gestion intelligente des stocks et des entrepôts, avant et après la fabrication. De plus en plus d'entreprises s'appuient sur l'IA pour rendre leur logistique plus fluide, plus réactive et plus efficiente.

Les systèmes intelligents permettent notamment de :

- a. Surveiller en continu les niveaux de stock et la circulation des matériaux dans l'usine et les entrepôts.
- b. Envoyer des alertes aux responsables lorsque certains seuils sont atteints.
- c. Passer automatiquement des commandes pour réapprovisionner les matières premières ou les produits finis.
- d. Identifier les goulets d'étranglement logistiques, que ce soit dans les zones de stockage ou sur les lignes de production.
- e. Optimiser les trajets et les déplacements des opérateurs, des machines ou des robots pour gagner du temps et éviter les collisions ou retards.

Prenons l'exemple d'Amazon, qui combine ressources humaines et robots autonomes dans ses centres logistiques : l'IA y orchestre les flux entrants et sortants, en déterminant l'ordre optimal de préparation des commandes et les itinéraires les plus efficaces pour les robots chargés de récupérer les produits.

De la même manière qu'une IA peut ajuster les processus de fabrication en se basant sur la théorie des contraintes, elle peut aussi analyser les données historiques, anticiper les ruptures de stock, et ajuster les approvisionnements pour maintenir la continuité de production.

Ce type de système est particulièrement utile pour les secteurs sensibles au facteur temps, comme l'industrie pharmaceutique ou agroalimentaire. Une IA dédiée peut calculer les

volumes nécessaires en fonction de la durée de conservation, des délais de livraison, et d'autres variables critiques, garantissant ainsi une gestion optimisée des ressources périssables.

08. Exemple n° 8 d'IA dans la fabrication : Chaînes d'approvisionnement intelligentes et connectées

Dans le domaine manufacturier, une chaîne d'approvisionnement fluide et bien coordonnée est essentielle pour garantir le bon fonctionnement de l'ensemble du processus de production. Les fabricants doivent pouvoir compter sur des livraisons ponctuelles et assurer un suivi rigoureux de leurs matières premières et produits finis, aussi bien en amont qu'en aval de la production. Toutefois, gérer cette logistique complexe entre différents fournisseurs et clients reste une tâche chronophage et sujette aux erreurs.

L'intelligence artificielle transforme cette réalité en rendant les chaînes d'approvisionnement plus transparentes, plus connectées et plus prédictives. En consolidant les données issues de multiples partenaires (fournisseurs, distributeurs, transporteurs), l'IA crée une vision centralisée et dynamique de l'ensemble de la chaîne.

Elle offre ainsi plusieurs avantages concrets :

- **Visibilité en temps réel** : En intégrant l'ensemble des flux d'informations, l'IA permet un suivi instantané des stocks, des livraisons, des statuts de production et des commandes. En cas d'incident (retard, rupture, anomalie), elle peut automatiquement générer des alertes ciblées.
- **Prévisions intelligentes** : En analysant les données historiques, l'IA anticipe les besoins futurs en matériaux ou en produits finis, permettant aux entreprises d'ajuster leurs approvisionnements de manière proactive.
- **Amélioration des relations fournisseurs** : Les systèmes intelligents peuvent évaluer la fiabilité des fournisseurs sur la durée (respect des délais, qualité, réactivité), ce qui aide les fabricants à prendre des décisions stratégiques pour optimiser leurs partenariats.
- **Optimisation de la logistique** : En tenant compte des variables comme le trafic, la météo ou les coûts énergétiques, l'IA peut déterminer les itinéraires les plus efficaces pour la livraison des produits, réduisant ainsi les délais et les coûts de transport.

En somme, l'intelligence artificielle donne aux entreprises industrielles les moyens d'orchestrer leur chaîne d'approvisionnement avec agilité, tout en gagnant en visibilité, en fiabilité et en performance.

09. Exemple n° 9 d'IA dans la fabrication : Les prévisions de la demande déterminent les stratégies futures

L'intelligence artificielle révolutionne la manière dont les fabricants anticipent les besoins du marché. Grâce à sa capacité à analyser de vastes ensembles de données, l'IA permet aujourd'hui de prévoir la demande avec une précision inédite, aidant ainsi les entreprises à adapter leur production et leur logistique aux évolutions du marché.

Pour cela, les algorithmes d'apprentissage automatique s'appuient sur plusieurs types de données, notamment :

- **Données historiques** : statistiques de ventes passées, cycles saisonniers et habitudes de consommation.
- **Tendances actuelles** : analyses des réseaux sociaux, suivi de l'activité des concurrents, préférences des clients et campagnes marketing en cours.
- **Facteurs externes** : conjoncture économique, météo, événements géopolitiques, etc.

Prenons l'exemple du secteur de la mode, où la demande est fortement influencée par la saison, les tendances stylistiques et les comportements des consommateurs. L'IA permet à ces entreprises de détecter en temps réel les signaux du marché, d'anticiper les produits les plus demandés, et ainsi de mieux gérer leurs stocks et leurs flux de production.

Cependant, l'anticipation de la demande comporte toujours une part d'incertitude. C'est pourquoi l'IA ne se contente pas de prévoir ; elle évalue également les risques liés aux prévisions en simulant différents scénarios (pénuries, surstocks, variations de prix, etc.). Les décideurs obtiennent ainsi une vue globale des opportunités et des risques, ce qui les aide à élaborer des stratégies plus robustes et résilientes.

En résumé, l'IA transforme la prévision de la demande en un levier stratégique, permettant aux industriels d'aligner leur production sur les dynamiques du marché, de minimiser les pertes et de mieux répondre aux attentes des clients.

10. Exemple n° 10 d'IA dans la fabrication : Réduction des coûts et amélioration de la rentabilité

L'un des principaux moteurs de l'intégration de l'intelligence artificielle dans le secteur industriel est sans conteste la recherche de performance économique. En effet, les technologies basées sur l'IA permettent d'optimiser les opérations tout en réduisant les coûts, ce qui renforce directement la rentabilité globale des entreprises manufacturières.

Les outils intelligents comme les jumeaux numériques, les systèmes prédictifs, les robots collaboratifs et les systèmes d'inspection automatisés contribuent à automatiser les processus, à anticiper les défaillances, à limiter les pertes de matière et à améliorer la qualité de la production.

Grâce à ces technologies, les entreprises peuvent :

- ✓ Réduire les dépenses en limitant les interruptions, les erreurs humaines et le gaspillage.
- ✓ Augmenter leurs marges en accélérant les cycles de production et en améliorant la satisfaction client.

Alors, avec tout ce que l'IA a à offrir, comment allez-vous utiliser l'IA dans l'industrie manufacturière [17].

II-2. Optimisation des procédés de fabrication dans les PMI par l'intelligente artificiel

Les Petites et Moyennes Industries (PMI) représentent un pilier essentiel de l'économie, notamment dans le secteur industriel. Ces entreprises, bien qu'agiles et dynamiques, font face à plusieurs défis : contraintes budgétaires, pression concurrentielle, pénurie de main-d'œuvre qualifiée et exigences croissantes en matière de qualité, de délais et de personnalisation. Pour rester compétitives, elles doivent continuellement optimiser leurs procédés de fabrication, c'est-à-dire améliorer l'ensemble des opérations de production afin d'en maximiser l'efficacité, la fiabilité et la rentabilité.

II-2.1. Définition de l'optimisation des procédés de fabrication

L'optimisation des procédés de fabrication consiste à analyser et améliorer les différentes étapes d'un processus industriel, dans le but de :

- ✓ Réduire les coûts de production (matière première, énergie, temps),
- ✓ Accroître la productivité (plus de produits en moins de temps),
- ✓ Améliorer la qualité et la régularité des produits finis,
- ✓ Réduire les pertes, les rebuts et les arrêts de production,
- ✓ Renforcer la traçabilité et la flexibilité de la ligne de fabrication.

Cette optimisation repose traditionnellement sur des méthodes statistiques, des outils de gestion de la qualité (comme le Lean manufacturing ou le Six Sigma), ou encore des logiciels de gestion industrielle (ERP, MES). Cependant, ces outils atteignent parfois leurs limites dans des environnements complexes ou en constante évolution.

II-2.2. Qu'est-ce que l'Intelligence Artificielle et son impact sur la productivité?

L'intelligence artificielle (IA) est une technologie de pointe qui permet aux machines d'apprendre, de raisonner et de résoudre des problèmes de manière autonome. En s'appuyant sur des algorithmes complexes et des modèles d'apprentissage automatique, l'IA est capable d'examiner d'importants volumes de données, d'identifier des schémas complexes — ce qui relève de l'IA analytique et de prendre des décisions précises, domaine de l'IA décisionnelle.

Son influence sur la productivité est majeure : elle permet l'automatisation des tâches répétitives, accroît l'efficacité des processus et libère les employés pour qu'ils se concentrent sur des missions à plus forte valeur ajoutée. Par ailleurs, l'IA prédictive joue un rôle crucial dans l'innovation, en fournissant des prévisions fiables et en facilitant la création de solutions sur mesure.

L'adoption de l'intelligence artificielle permet ainsi aux entreprises d'optimiser leurs opérations tout en maintenant leur compétitivité dans un contexte numérique en constante mutation [18].

II-2.3. Apport de l'intelligence artificielle dans cette optimisation

L'intelligence artificielle (IA) permet de franchir un nouveau cap dans l'optimisation des procédés industriels. En effet, l'IA repose sur des technologies capables de :

- **Analyser automatiquement des données massives (Big Data)** générées par les machines, les capteurs ou les systèmes d'information,

- **Apprendre** à partir de ces données (machine learning, deep learning),
- **Déetecter des modèles, des anomalies et des opportunités d'amélioration** souvent invisibles à l'œil humain,
- **Prédire** des comportements futurs (par exemple : pannes, variations de qualité, pics de demande),
- Et dans certains cas, **prendre des décisions ou recommandations en temps réel** (IA embarquée, systèmes experts, agents intelligents).

II-2.4. Applications concrètes dans les PMI

Dans le contexte actuel de transformation industrielle, les Petites et Moyennes Industries (PMI) adoptent progressivement des solutions technologiques et organisationnelles innovantes afin d'accroître leur performance et de rester compétitives sur un marché en constante évolution. L'automatisation représente l'un des premiers leviers mobilisés, notamment à travers l'intégration de robots collaboratifs (ou cobots), qui assistent les opérateurs dans les tâches répétitives ou à faible valeur ajoutée, tout en garantissant une flexibilité adaptée à la diversité des productions (IFR, 2023).

Par ailleurs, la digitalisation des processus de production s'intensifie, notamment grâce à l'usage croissant de logiciels de GPAO (Gestion de la Production Assistée par Ordinateur), qui permettent d'optimiser la planification, la gestion des stocks et le suivi des ordres de fabrication (Durand, 2020). Certains établissements vont plus loin en déployant des systèmes MES (Manufacturing Execution System), capables de fournir une traçabilité fine et un pilotage en temps réel de l'atelier (Baudin, 2019). En parallèle, les PMI s'ouvrent aux technologies de maintenance prédictive, rendue possible par l'Internet des objets (IoT) et l'analyse des données issues des machines. Ces approches permettent d'anticiper les défaillances et de limiter les interruptions de production, contribuant ainsi à une meilleure disponibilité des équipements (Lee et al., 2014). L'amélioration continue constitue également un pilier stratégique dans les PMI, via l'implémentation de méthodes issues du Lean Manufacturing, telles que les 5S, le Kaizen ou le SMED, qui visent à réduire les gaspillages, améliorer les flux et renforcer l'efficience globale (Ohno, 1988 ; Womack & Jones, 1996). En réponse à la demande croissante de personnalisation, certaines PMI se tournent vers des solutions de production flexibles et reconfigurables, capables d'ajuster rapidement les lignes en fonction des commandes spécifiques (Koren et al., 2013).

Enfin, la montée en compétences des équipes constitue un enjeu majeur : des outils de formation innovants, tels que la réalité augmentée ou les simulateurs interactifs, permettent de former efficacement les opérateurs aux nouvelles technologies (Porter & Heppelmann, 2017). L'ensemble de ces évolutions illustre une transformation progressive mais déterminée des PMI vers un modèle plus agile, plus numérique et mieux adapté aux exigences de l'industrie du futur.

II-2.5. Enjeux et défis pour les PMI

Les Petites et Moyennes Industries (PMI) se trouvent aujourd'hui à la croisée des chemins, confrontées à des enjeux majeurs liés à la transformation numérique, à la compétitivité globale et à l'évolution rapide des attentes du marché. L'un des principaux défis réside dans la nécessité de moderniser les outils de production pour intégrer les technologies de l'industrie 4.0, telles que l'automatisation intelligente, l'Internet des objets (IoT), la fabrication additive ou encore l'intelligence artificielle. Toutefois, ces évolutions supposent des investissements importants, souvent difficiles à mobiliser pour des structures disposant de ressources limitées, tant humaines que financières. La transition vers une industrie plus connectée et flexible nécessite également une montée en compétences des équipes, posant la question de la formation continue et de l'attractivité des métiers industriels auprès des jeunes générations.

Par ailleurs, les PMI doivent faire face à une concurrence internationale accrue, notamment de la part de pays à bas coûts de production, ce qui les pousse à rechercher en permanence des gains de productivité, sans pour autant sacrifier la qualité ou la personnalisation des produits. Elles doivent également s'adapter aux nouvelles exigences des clients en matière de traçabilité, de durabilité et de réactivité, ce qui impose une plus grande agilité organisationnelle et une maîtrise renforcée de la chaîne logistique.

Enfin, l'incertitude économique et les tensions géopolitiques récentes (pénuries, hausses des coûts de l'énergie, instabilité des approvisionnements) accentuent les contraintes pesant sur ces structures, rendant la gestion des risques et la résilience industrielle plus cruciales que jamais. Dans ce contexte, les PMI doivent repenser leur modèle de développement en s'appuyant sur l'innovation, la coopération avec d'autres acteurs (clusters, centres techniques, partenaires technologiques) et un accompagnement stratégique adapté à leurs spécificités.

II-2.6. Perspectives d'évolution

À l'avenir, les PMI seront de plus en plus appelées à adopter des pratiques issues de l'industrie 4.0, avec une forte intégration entre le numérique, les données, l'intelligence artificielle et l'automatisation. L'usine intelligente n'est plus réservée aux grands groupes : les

PMI peuvent, elles aussi, en tirer des bénéfices considérables, à condition de bien accompagner cette transition.

II-3. Plateforme de maintenance intelligente

II-3.1. Définition

La maintenance intelligente fait partie des principaux scénarios d'utilisation de l'industrie 4.0. En effet, avec les bons outils numériques, les entreprises peuvent prolonger la durée de vie des machines et des installations et les exploiter de manière beaucoup plus rentable.

Jusqu'à présent, seule une minorité d'entreprises allemandes utilise toutefois la Smart Maintenance. Selon Indice de numérisation ce chiffre n'est que de 21%.

Dans l'industrie 4.0, la smart maintenance désigne toutes les mesures techniques et organisationnelles qui visent à rendre la maintenance et l'entretien plus efficaces à l'aide d'outils numériques et à contribuer à une plus grande valeur ajoutée de l'entreprise. Le cœur de la Smart Maintenance est la collecte et la mise en relation des données des machines, des installations ou des bâtiments. Les infrastructures techniques sont équipées de capteurs qui mesurent en permanence leur fonctionnement et leurs performances et transmettent les données à des applications numériques, dans le meilleur des cas une plateforme centrale d'applications. Il en résulte diverses possibilités d'utilisation. Cela pourrait également vous intéresser :

- **Logiciel de maintenance** : Ce à quoi vous devez absolument faire attention
- **Réalité augmentée** : Opportunités pour l'industrie [19].

Avec l'avènement de l'Industrie 4.0, les entreprises industrielles sont de plus en plus incitées à transformer leur approche de la maintenance. Traditionnellement réactive ou préventive, la maintenance devient aujourd'hui prédictive, autonome et connectée, grâce à l'intégration des technologies numériques. Dans ce contexte, les plateformes de maintenance intelligente émergent comme des solutions centrales pour piloter cette transformation.

Aussi appelée IMMP (pour Intelligent Maintenance Management Platform en anglais), une plateforme de maintenance intelligente est un système logiciel intégré, souvent hébergé dans le cloud, qui permet de centraliser, analyser et exploiter les données issues des équipements industriels en vue d'optimiser les stratégies de maintenance. Elle s'appuie sur une combinaison de technologies : capteurs IoT, intelligence artificielle, apprentissage automatique, systèmes de gestion des actifs (EAM/CMMS), et interfaces de visualisation.

L'objectif principal est de prévenir les pannes, allonger la durée de vie des actifs, réduire les coûts d'exploitation et améliorer la sécurité des opérations. En ce sens, une PMI travaille main dans la main avec différentes technologies, telles que :

- ✓ L'intelligence artificielle, ou IA ;
- ✓ L'internet des objets, ou IoT.

Concrètement, les données clés vont être collectées et analysées, le but étant d'améliorer un processus de maintenance traditionnel désuet, généralement réactif, pour le rendre proactif et prédictif. Comme dit l'adage, mieux vaut prévenir que guérir !

Logiciel, ou plateforme ? Si les logiciels sont considérés comme statiques, les PMI ont une architecture dynamique, elles peuvent être intégrées aux outils ou équipements déjà en place. On parle alors de plateforme, et non de logiciel [20].

II-3.2. Les 3 types de maintenance intelligente

L'évolution des stratégies de maintenance illustre la transition progressive de l'industrie vers des approches de plus en plus proactives, intelligentes et optimisées. La maintenance traditionnelle, encore largement présente dans les PMI, repose sur une logique réactive qui peut engendrer des interruptions coûteuses. À l'inverse, la maintenance préventive permet d'éviter certaines pannes, mais au prix d'interventions parfois prématurées. La maintenance prédictive marque un tournant technologique en exploitant les données issues des capteurs pour anticiper les défaillances, tandis que la maintenance prescriptive représente l'étape la plus avancée, en mobilisant l'intelligence artificielle pour optimiser les décisions de maintenance en temps réel. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, ces deux dernières approches sont étroitement liées au développement des plateformes de maintenance intelligente, qui intègrent les outils numériques (IoT, cloud, big data) pour transformer durablement la gestion des actifs industriels.

La maintenance intelligente se décompose en 3 catégories, chacune proposant une approche qui lui est spécifique, mais dont l'objectif est toujours d'optimiser le processus de gestion et de maintenance.

La maintenance prédictive

La maintenance prédictive se base sur les algorithmes et analyses des données clés pour prédire le moment où un équipement est susceptible de tomber en panne. C'est là que rentre en jeu l'intelligence artificielle que nous avons précédemment mentionné.

C'est elle, entre autres, qui interprète les données pour évaluer l'état actuel des équipements et prédire les défaillances futures.

Prenons un exemple : Le système peut surveiller les vibrations d'un moteur industriel et utiliser les données historiques pour identifier des modèles ou des anomalies qui précèdent souvent les pannes. Ainsi, la maintenance peut être planifiée avant qu'une panne réelle ne survienne, réduisant les temps d'arrêt non planifiés.

La maintenance conditionnelle

Similaire à la maintenance prédictive, on retrouve ensuite la maintenance conditionnelle, si ce n'est qu'elle se concentre sur l'état réel de l'équipement pour déterminer quand une intervention sera nécessaire.

En outre, elle repose sur une surveillance continue des paramètres clés de performance et des indicateurs de condition pour déclencher des actions de maintenance.

Un exemple pour illustrer tout ça : Si un capteur de température indique une augmentation anormale de la chaleur dans une pièce de machine, cela peut déclencher une inspection ou une maintenance immédiate, même si la machine continue de fonctionner normalement.

La maintenance prescriptive

Après la maintenance prédictive, une nouvelle étape est franchie avec la maintenance prescriptive, qui en constitue une évolution logique. Contrairement à la prédictive, qui anticipe les pannes, la maintenance prescriptive va plus loin en proposant des actions concrètes pour éviter ou résoudre les défaillances détectées.

L'intelligence artificielle joue ici un rôle central, puisqu'elle analyse les différentes stratégies possibles et recommande les solutions les plus pertinentes en fonction du contexte. Prenons un exemple pour illustrer ce processus :

Un système détecte qu'un composant est sur le point de tomber en panne. Grâce à l'IA, plusieurs scénarios sont alors envisagés :

- ✓ Le remplacement immédiat de la pièce concernée ;
- ✓ La reconfiguration de l'équipement afin de diminuer sa charge de fonctionnement ;
- ✓ L'ajustement des paramètres d'usage pour prolonger la durée de vie du composant [20].

II-3.3. Architecture technique et composants des plateformes de maintenance intelligente

Les plateformes de maintenance intelligente sont des systèmes technologiques qui permettent de surveiller en temps réel l'état des équipements industriels, de détecter des anomalies et de recommander ou planifier des interventions. Elles reposent sur une architecture modulaire et interconnectée, combinant capteurs, connectivité, traitement des données, intelligence artificielle et interfaces utilisateur.

a. Capteurs IoT (Internet des Objets Industriels)

Les capteurs intelligents sont les éléments de base de ces plateformes. Fixés sur les machines, ils collectent des données en temps réel sur :la température, les vibrations, la pression, la consommation électrique, la vitesse de rotation ou le débit. Ces informations permettent de surveiller l'état de fonctionnement des équipements et d'identifier les premiers signes d'usure ou de dérèglement.

b. Systèmes de communication et connectivité

Les données issues des capteurs doivent être transmises vers les serveurs de traitement. Cela se fait via des réseaux industriels adaptés :

Protocoles : OPC UA, Modbus, MQTT (interopérabilité entre équipements hétérogènes),

Réseaux : Ethernet industriel, 5G, LoRaWAN, Wi-Fi industriel.

Ces technologies assurent une communication rapide, fiable et sécurisée, même dans des environnements complexes.

c. Systèmes de stockage et traitement : cloud et edge computing Les plateformes utilisent deux types de traitement des données :

Cloud computing : stockage centralisé, analyse à grande échelle, visualisation des données depuis plusieurs sites. Il permet d'héberger les modèles d'IA et de centraliser les historiques de maintenance.

Edge computing : traitement local, directement sur ou à proximité des machines (capteurs intelligents ou passerelles). Il réduit la latence et garantit une réaction immédiate en cas d'urgence.

d. Intelligence artificielle (moteur d'analyse)

Le cœur de la plateforme est souvent un moteur d'intelligence artificielle basé sur la machine learning ou le deep learning. Il permet de :

- ✓ Déetecter automatiquement des anomalies (signaux faibles de panne),
- ✓ Prédire l'évolution de l'état d'un équipement,
- ✓ Recommander des actions optimales de maintenance (prescription).

L'IA s'appuie sur les données historiques et les retours en temps réel pour affiner ses prédictions et améliorer la fiabilité des décisions.

e. Interfaces utilisateurs (IHM)

Les informations traitées sont présentées aux techniciens et ingénieurs via : des tableaux de bord dynamiques, des alertes automatisées, des recommandations de planification, des rapports de diagnostic.

Ces interfaces simplifient la lecture des données complexes et permettent une prise de décision rapide.

L'architecture d'une plateforme de maintenance intelligente repose sur une chaîne technologique complète : capteurs, connectivité, traitement des données (edge/cloud), intelligence artificielle, et interfaces utilisateurs. Cette architecture permet d'atteindre les objectifs de l'industrie 4.0 :

- ✓ Surveillance continue,
- ✓ Réduction des arrêts non planifiés,
- ✓ Optimisation des coûts,
- ✓ Amélioration de la durée de vie des équipements.

II-3.4. Fonctionnement global des plateformes de maintenance intelligente

Les plateformes de maintenance intelligente s'inscrivent dans une logique de surveillance proactive, de prise de décision assistée par les données et d'amélioration continue. Leur fonctionnement repose sur une chaîne technologique composée de capteurs, de réseaux, de solutions de traitement et d'analyse, et d'interfaces utilisateurs. L'objectif est d'anticiper les défaillances et d'optimiser la performance des équipements industriels.

a. Collecte de données en temps réel

La première étape du fonctionnement repose sur la collecte massive de données. Des capteurs IoT placés sur les équipements mesurent en temps réel des variables telles que : les vibrations, la température, la pression, le courant électrique, ou encore le débit.

Ces capteurs peuvent être intégrés nativement aux machines ou ajoutés après coup pour moderniser des équipements existants.

b. Transmission et traitement des données

Les données sont transmises via des réseaux industriels (Ethernet, Wi-Fi, 5G, LoRaWAN...) à des plateformes locales ou dans le cloud. Deux approches coexistent :

Edge computing : traitement local des données à la périphérie du réseau, souvent sur des passerelles ou automates. Cela permet une réactivité immédiate.

Cloud computing : traitement dans des centres de données distants, offrant une capacité de calcul importante et un accès à long terme aux historiques.

Les données sont ensuite pré-traitées (filtrage, nettoyage, normalisation) avant d'être analysées.

c. Analyse et diagnostic par l'intelligence artificielle

Les données nettoyées sont analysées par des algorithmes de machine learning ou de deep learning qui peuvent :

- ✓ Déetecter des anomalies en comparant les comportements actuels à des modèles appris,
- ✓ Prédire une défaillance à venir (prédiction du temps restant avant panne),
- ✓ Prescrire des actions optimales (remplacement, inspection, lubrification, etc.).

Ces analyses permettent de passer d'une maintenance préventive à une maintenance prédictive voire prescriptive, en réduisant les arrêts non planifiés et en améliorant la disponibilité des actifs.

d. Interfaces utilisateurs et visualisation

Les résultats de l'analyse sont présentés sous forme d'interfaces homme-machine (IHM) ergonomiques :

- ✓ Tableaux de bord en temps réel,

- ✓ Graphiques de tendances (température, vibrations, etc.),
- ✓ Alertes visuelles et sonores,
- ✓ Rapports automatisés et historiques de panne.

Ces visualisations facilitent la prise de décision rapide par les équipes de maintenance et contribuent à la planification des interventions.

e. Réajustement et amélioration continue

Le fonctionnement des plateformes repose sur une boucle de rétroaction :

- ✓ Les modèles d'IA sont entraînés en continu avec les nouvelles données collectées.
- ✓ Le système apprend des échecs et des interventions réussies.
- ✓ L'efficacité prédictive s'améliore avec le temps.

Ce mécanisme d'auto-amélioration permet une adaptation constante à l'évolution des conditions de production et aux dérives lentes des équipements.

II-3.5. Exemples concrets de plateformes de maintenance intelligente

Plusieurs grandes entreprises et acteurs technologiques ont développé des solutions concrètes de maintenance intelligente, aujourd'hui déployées dans des usines, des infrastructures industrielles ou énergétiques. Ces plateformes illustrent comment l'intelligence artificielle, l'IoT industriel, le cloud et l'analyse prédictive se combinent pour transformer la maintenance traditionnelle.

a. Siemens – MindSphere

MindSphere est une plateforme IoT industrielle développée par Siemens. Elle connecte les équipements industriels à un environnement cloud sécurisé, permettant de :

- ✓ Collecter des données machine en temps réel,
- ✓ Appliquer des algorithmes d'analyse prédictive,
- ✓ Alerter les équipes techniques en cas de dérive,
- ✓ Gérer la maintenance à distance.

Elle intègre des outils d'intelligence artificielle pour la détection précoce de défaillances et le diagnostic automatisé.

b. IBM Maximo Application Suite

IBM propose avec Maximo une suite complète de gestion des actifs (EAM – Enterprise Asset Management) intégrant : des modules de maintenance prédictive, des capacités de vision par ordinateur (IA + caméra), la gestion des interventions mobiles, et une intégration fluide avec l'IoT et le cloud (notamment via IBM Watson).

Grâce à l'IA, Maximo anticipe les pannes et prescrit les meilleures actions à réaliser.

c. General Electric – Predix

Predix est la plateforme industrielle développée par General Electric pour le suivi et l'optimisation des actifs lourds (turbines, trains, centrales électriques...). Elle propose :

- ✓ La surveillance conditionnelle des équipements,
- ✓ Des modèles prédictifs personnalisés selon les données historiques de chaque machine,
- ✓ Des visualisations temps réel et une gestion intelligente des ordres de travail.

Predix est largement utilisé dans les secteurs de l'énergie, du transport et de l'aéronautique.

d. Dassault Systèmes – DELMIA Apriso

DELMIA Apriso est une solution de gestion des opérations de production intégrant des fonctions de maintenance intelligente. Elle permet :

- ✓ D'analyser les données des capteurs d'atelier,
- ✓ De créer des règles automatiques de maintenance (basées sur des seuils, des historiques ou des modèles ML),
- ✓ De relier la maintenance aux autres fonctions de production (qualité, performance...).

Cette approche unifie l'exécution de la production et la gestion proactive de la maintenance.

e. Braincube – Plateforme industrielle française

Braincube est une solution développée en France, centrée sur l'analyse industrielle en temps réel. Elle propose :

- ✓ Un jumeau numérique (digital twin) de chaque équipement,
- ✓ Des modèles de prédiction basés sur l'IA,

Une interface de pilotage simple pour les équipes maintenance. Elle est utilisée dans plusieurs secteurs (agroalimentaire, métallurgie, automobile).

II-3.6. Bénéfices et défis de la mise en œuvre des plateformes de maintenance intelligente dans les PMI

L'adoption de plateformes de maintenance intelligente représente une opportunité stratégique majeure pour les Petites et Moyennes Industries (PMI). Cependant, leur déploiement implique aussi des défis techniques, humains et financiers. Il est essentiel de bien comprendre à la fois les apports concrets de ces technologies et les freins potentiels à leur intégration.

A. Bénéfices pour les PMI

1. Réduction des pannes et des arrêts non planifiés

L'un des principaux avantages est la capacité à anticiper les défaillances :

- ✓ Moins d'interruptions imprévues,
- ✓ Diminution des pertes de production,
- ✓ Amélioration de la qualité des produits.

2. Optimisation des coûts de maintenance

La maintenance intelligente permet de :

- ✓ Réduire les interventions inutiles (vs maintenance préventive rigide),
- ✓ Allonger la durée de vie des équipements,
- ✓ Réduire les stocks de pièces détachées (grâce à une meilleure planification).

3. Gain de productivité et d'efficacité

Les plateformes permettent une meilleure allocation des ressources humaines :

- ✓ Les techniciens se concentrent sur les tâches à forte valeur ajoutée,
- ✓ L'analyse automatique fait gagner du temps sur les diagnostics.

Cela améliore aussi la performance globale de l'usine (OEE – Overall Equipment Effectiveness).

4. Amélioration de la traçabilité et de la conformité

Grâce à l'archivage automatisé des données, les entreprises peuvent :

- ✓ Justifier leurs interventions (utile en audit ou certification),
- ✓ Assurer une traçabilité complète des opérations de maintenance.

5. Accélération de la transformation numérique

La mise en œuvre de plateformes intelligentes est souvent un levier d'industrialisation 4.0 :

- ✓ Introduction de l'IoT, du cloud et de l'IA,
- ✓ Montée en compétences des équipes,
- ✓ Modernisation progressive des ateliers.

B. Défis et limites à surmonter

1. Investissement initial élevé

Les plateformes nécessitent :

- ✓ L'achat de capteurs, automates ou passerelles IoT,
- ✓ Des abonnements cloud ou logiciels,
- ✓ La formation du personnel.

Pour les PMI, ces coûts peuvent représenter un frein sans aides publiques ou subventions (type plan France Relance).

2. Compétences internes parfois limitées

La gestion de données, la cybersécurité ou l'analyse prédictive exigent des compétences nouvelles. Les PMI doivent :

- ✓ Former leurs équipes,
- ✓ Ou collaborer avec des intégrateurs externes.

3. Complexité d'intégration avec les systèmes existants

Les anciens équipements ne sont pas toujours connectés ou compatibles. Il peut être nécessaire de :

- ✓ Adapter les machines,
- ✓ Utiliser des capteurs externes,
- ✓ Connecter des systèmes hétérogènes (ERP, GMAO, MES...).

Conclusion

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les systèmes de production représente une opportunité majeure pour les PMI en quête de modernisation. Grâce à l'automatisation intelligente, la maintenance prédictive et l'optimisation des procédés, l'IA permet d'accroître la productivité, de réduire les coûts et d'améliorer la flexibilité opérationnelle. Toutefois, cette transition implique des défis d'ordre technique, financier et humain que les entreprises doivent anticiper à travers des stratégies adaptées et un accompagnement ciblé.

Chapitre 3 : Les principales technologies de l'industrie

4.0

Introduction

L'Industrie 4.0, également appelée la quatrième révolution industrielle, se caractérise par l'intégration croissante des technologies numériques dans les systèmes de production. Cette transformation profonde vise à rendre les industries plus intelligentes, flexibles et connectées. Au cœur de cette révolution, plusieurs technologies émergent comme des leviers majeurs de compétitivité et d'innovation.

Ce chapitre se propose d'examiner trois de ces technologies phares qui façonnent le paysage industriel moderne : le Big Data, qui permet une exploitation massive et stratégique des données ; l'impression 3D, qui bouleverse les méthodes de fabrication traditionnelles ; et l'Internet des objets (IoT), qui connecte les équipements pour une meilleure gestion en temps réel. Chacune de ces technologies joue un rôle clé dans l'amélioration de la productivité, la personnalisation des produits, la réduction des coûts et l'optimisation des processus.

À travers une présentation claire et générale de ces technologies, ce chapitre vise à souligner leur importance stratégique dans la mise en place d'une industrie plus performante et résiliente, en phase avec les exigences du XXI^e siècle.

III-1. Le big data

Bien que le concept de big data remonte à la Seconde Guerre mondiale, ce n'est que récemment qu'il a été officiellement intégré aux dictionnaires et au langage courant. Ce développement s'est accéléré avec l'émergence du Wi-Fi, du Web 2.0 et des technologies connectées, qui ont profondément transformé la manière dont les données sont produites et exploitées.

Aujourd'hui, grâce à l'intelligence artificielle, la collecte, le traitement et l'analyse de vastes volumes de données sont devenus non seulement possibles, mais également essentiels pour de nombreux secteurs d'activité [21].

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, le Big Data fait référence à l'ensemble massif de données générées en temps réel par des capteurs, des équipements industriels connectés, des systèmes de gestion (ERP, MES), des plateformes IoT, ou encore des interactions humaines et environnementales. Ces données sont souvent caractérisées par les « 5 V » : volume, vélocité, variété, véracité et valeur. L'objectif n'est pas seulement de collecter ces données, mais surtout de les exploiter intelligemment pour améliorer la performance industrielle. C'est ici que les

technologies d'analyse avancée, telles que le machine learning, l'intelligence artificielle et les algorithmes prédictifs, entrent en jeu.

Dans le domaine de la maintenance intelligente, le Big Data permet de passer d'une maintenance réactive ou préventive à une maintenance prédictive. En analysant en continu les données issues des équipements (température, vibrations, pression, cycles de fonctionnement, etc.), les plateformes intelligentes sont capables de :

- ✓ Déetecter des anomalies avant qu'une panne ne survienne ;
- ✓ Prédire la durée de vie restante d'un composant ;
- ✓ Planifier les interventions au moment optimal, réduisant ainsi les temps d'arrêt imprévus ;
- ✓ Optimiser l'allocation des ressources humaines et matérielles ;
- ✓ Améliorer la sécurité et la fiabilité globale des installations.

De plus, en croisant les données de production, de maintenance et de qualité, les entreprises peuvent mieux comprendre les causes profondes des défaillances, et ainsi améliorer en continu leurs processus industriels. Ainsi, le Big Data n'est pas seulement un outil d'analyse : il devient un levier stratégique au service de la compétitivité, de la résilience et de l'innovation dans l'usine connectée de demain.

III-1.1. Qu'est-ce que le big data?

Le big data désigne des ensembles de données si vastes et complexes qu'ils dépassent les capacités des outils classiques de traitement et de gestion de l'information. L'émergence de technologies comme les objets connectés (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et la mobilité numérique a largement contribué à la montée en puissance de ce phénomène.

Aujourd'hui, des services tels que la géolocalisation, les réseaux sociaux, les applications mobiles ou encore le suivi des historiques de navigation génèrent un flux constant et massif de données. Le terme big data fait donc référence à l'ensemble des méthodes permettant de collecter, stocker et analyser ces volumes d'informations numériques.

Dans un contexte professionnel, ces données alimentent la Business Intelligence (BI), qui consiste à valoriser les données au profit des services stratégiques comme le marketing ou les ventes.

Avec l'augmentation continue du volume de données générées en temps réel par les applications, les entreprises sont désormais amenées à adopter des solutions cloud pour assurer un traitement efficace, une gestion optimisée et une analyse performante de leurs données [21].

III-1.2. Les 5 V du big data

Le concept de Big Data repose souvent sur le modèle des 5 V, une grille de lecture largement adoptée par les professionnels pour en comprendre les enjeux et les spécificités. Voici ces cinq dimensions fondamentales :

- ✓ **Volume** : Il s'agit de la quantité massive de données générées chaque jour. Il est essentiel d'élaborer une stratégie pour stocker, structurer et héberger efficacement ces données, qu'elles soient locales ou dans le cloud.
- ✓ **Variété** : Les données proviennent de sources multiples (textes, images, vidéos, capteurs, réseaux sociaux, etc.). Il faut donc identifier ces sources et utiliser des outils adaptés pour ingérer et intégrer cette diversité de formats dans les systèmes de traitement.
- ✓ **Vitesse** : Le rythme de génération et de traitement des données est un facteur critique. Les entreprises doivent disposer de technologies capables de traiter les flux de données en temps réel ou quasi-instantanément pour prendre des décisions rapides et pertinentes.
- ✓ **Véracité** : La fiabilité des données est primordiale. Il faut mettre en place des mécanismes pour filtrer, nettoyer et valider les informations, afin de garantir leur qualité et éviter les erreurs d'analyse.
- ✓ **Valeur** : L'objectif ultime du Big Data est de produire de la valeur. Cela signifie transformer les données en informations utiles et exploitables, en particulier pour alimenter les outils de Business Intelligence et soutenir les décisions stratégiques dans chaque service de l'entreprise.

III-1.3. Pourquoi le Big Data est devenu essentiel?

La société numérique et les consommateurs exigent désormais des réponses immédiates. Des transactions e-commerce aux avis marketing en ligne, tout dans le monde des affaires on-line et en lien avec le cloud évolue rapidement. Tous ces échanges numériques compilent des données à un rythme effréné.

La bonne utilisation de ces informations en temps réel implique de capitaliser les datas pour une vision à 360° de l'audience cible. Ne pas le faire crée le risque de perdre des clients au profit de concurrents qui utilisent ce processus intelligent.

Les possibilités (et pièges potentiels) liées à la gestion et à l'utilisation des données opérationnelles sont infinies. Toute les énumérer serait impossible alors voici les principales opportunités liées à une intégration réussie du Big Data dans le processus de transformation de son organisation [21].

III-1.4. Big Data et Business Intelligence

La Business Intelligence (BI) désigne l'ensemble des méthodes et outils utilisés pour collecter, analyser et exploiter des données massives dans le but de guider la stratégie d'une entreprise. Véritable levier dans la compétition économique actuelle, la BI permet d'anticiper les tendances, d'identifier les enjeux critiques et d'orienter les décisions en s'appuyant sur les capacités du Big Data. En croisant les données issues de différentes sources, elle fournit une vision approfondie du marché, mettant ainsi le Big Data au service de la performance et de l'innovation produit.

III-1.5. Big Data et innovation

Le Big Data joue aujourd'hui un rôle central dans le domaine de l'innovation. Il permet aux entreprises de concevoir de nouveaux produits, services et solutions technologiques plus intelligents, capables de répondre avec précision aux besoins du marché et de gérer des problématiques complexes.

Prenons l'exemple d'une entreprise fictive, Acme Widget Company. En analysant ses données, elle constate qu'en période de forte chaleur, les ventes du Widget B doublent dans la région du Midwest, contrairement aux autres zones comme la côte Ouest ou le Sud où les ventes restent stables.

Pour tirer parti de cette information, l'entreprise décide de lancer une campagne marketing ciblée sur les réseaux sociaux, spécifiquement orientée vers le Midwest, en mettant en avant la popularité et la disponibilité immédiate du Widget B dans cette zone. Dans ce cas, l'usage du Big Data permet à Acme d'adapter ses stratégies commerciales et de personnaliser sa communication, dans le but de maximiser ses résultats sur un segment géographique précis.

III-1.6. Une optimisation des coûts et investissements

Il est souvent dit qu'un centime économisé équivaut à un centime gagné. Dans cette optique, le Big Data représente une opportunité majeure pour réaliser des économies substantielles.

Les professionnels de l'informatique (IT) ne se limitent plus à évaluer les opérations en fonction des simples prix d'achat des équipements. Ils s'appuient désormais sur une analyse croisée incluant des éléments tels que les contrats annuels, les licences logicielles, ou encore les frais de personnel.

Les données issues de ces analyses Big Data permettent de faire émerger rapidement des points faibles ou lacunes commerciales, comme des ressources peu exploitées, ou des postes nécessitant des moyens supplémentaires. Ces informations aident les entreprises et leurs responsables à réadapter les budgets selon les mouvements du marché.

De nombreux secteurs d'activité exploitent aujourd'hui le Big Data comme outil d'innovation. Par exemple, les compagnies maritimes l'utilisent pour optimiser leurs temps de transit et établir des tarifs adaptés. Dans les domaines scientifique et médical, le Big Data permet d'accélérer les recherches en facilitant l'analyse de données à une échelle inédite, avec un impact direct sur notre mode de vie et nos habitudes quotidiennes [21].

III-1.7. Analyse et stockage Big Data: les entrepôts de données et data lakes

Le Big Data concerne surtout de nouveaux cas d'utilisation et de traitement numérique et pas tant les données en elles-mêmes. Le stockage, l'hébergement, et le management des datas « traditionnelles » doit donc évoluer pour répondre aux exigences du big data.

- Le manque de pertinence des data warehouses traditionnels**

L'analyse Big Data consiste à examiner de très grands ensembles de données granulaires pour découvrir des modèles et corrélations cachées ainsi que des tendances et de nouvelles informations aux niveaux commercial et marketing.

Les utilisateurs de cette technologie se retrouvent vite limités en utilisant un entrepôt de données (data warehouse) traditionnel. Le data warehouse stockait uniquement des données agrégées et ne permettait pas de réaliser des corrélations stratégiques et la résolution de problèmes complexes.

Afin d'obtenir une vue fine de vos clients, vous devez stocker des données précises, granulaires et au niveau nanométrique sur ces individus. C'est en utilisant l'analyse poussée de

données volumineuses comme l'exploration de data ou le machine learning que vous pourrez obtenir des informations précises et ciblées sur votre clientèle. L'entrepôt de données classique a donc dû laisser sa place à une autre solution d'hébergement et de stockage de la donnée.

- **Les data lakes, un stockage adapté aux ensembles volumineux de données**

Les data lakes (littéralement lacs de données en français) sont un référentiel de stockage central qui contient les données volumineuses provenant de nombreuses sources différentes et dans un format brut et granulaire. Le data lake peut stocker des données structurées, semi-structurées ou non structurées. Cela signifie qu'elles peuvent être conservées dans un format quelconque pour une utilisation flexible et un traitement futur.

Lors du stockage, le data lake associe la donnée à des identifiants et des balises de métadonnées pour une récupération plus rapide. Les data scientists peuvent alors accéder, préparer et analyser les informations plus rapidement et avec plus de précision. Pour les experts en analytique, ces vastes ensembles de données offrent une opportunité unique d'accéder aux informations et une variété de cas d'utilisation tels que l'analyse des émotions à travers la textuelle ou la détection de fraude.

III-1.8. Big Data, cloud computing et informatique sans serveur

Avant l'avènement des plateformes de cloud computing, les opérations de stockage et de traitement du Big Data étaient généralement réalisées en local, c'est-à-dire sur site.

L'émergence de services cloud comme Microsoft Azure, Amazon AWS ou Google BigQuery a permis de délocaliser ces traitements à distance, révolutionnant ainsi la gestion des données à grande échelle. En combinant le cloud à une architecture sans serveur (serverless), les entreprises bénéficient de nombreux avantages :

- ❖ **Efficacité accrue** : la séparation entre la couche de stockage et la couche de calcul permet de conserver les données aussi longtemps que nécessaire dans l'espace de stockage, sans mobiliser de ressources de calcul inutilement.
- ❖ **Gain de temps** : alors que la mise en place d'un cluster géré peut nécessiter plusieurs heures, voire plusieurs jours, une application Big Data sans serveur peut être déployée en quelques minutes seulement.
- ❖ **Tolérance aux pannes** : les architectures serverless prises en charge par les fournisseurs de cloud intègrent des mécanismes de gestion des incidents. Ces systèmes

garantissent une haute disponibilité et réduisent le besoin d'intervention humaine, rendant inutile la présence d'un administrateur dédié.

- ❖ **Mises à jour simplifiées :** grâce à des règles automatisées, les mises à jour peuvent être réalisées en fonction de la charge de travail, permettant une scalabilité dynamique et une réduction significative des coûts liés au traitement des données [21].

III-1.9. Utiliser le Big data: outils, produits et services

1) Comment intégrer le Big data ?

Pour traiter les ensembles de données volumineux, les spécialistes utilisent généralement Hadoop, MapReduce et Spark, 3 projets logiciels Apache.

➤ **Hadoop**

Hadoop est une solution logicielle open source conçue spécifiquement pour l'exploitation du Big Data. Les outils Hadoop permettent de répartir la charge de traitement requise pour traiter les ensembles massifs de datas sur des nœuds informatiques, qu'ils soient quelques-uns ou des centaines de milliers. Au lieu de déplacer un pétaoctet (unité de mesure équivalent à 2024 téraoctets) vers un minuscule site de gestion, Hadoop procède de manière inversée et accélère considérablement la vitesse à laquelle les ensembles d'informations peuvent être traités.

➤ **MapReduce**

MapReduce, comme son nom l'indique, a deux fonctions : compiler et cartographier (map) puis réduire (reduce). Ce logiciel compile et organise les ensembles de données pour ensuite les affiner en des plus petits ensembles organisés. Il est utilisé pour répondre et effectuer des tâches et requêtes internes à l'entreprise.

➤ **Spark**

Spark est également un projet open source de la fondation Apache. C'est un framework distribué ultra-rapide dédié à la manipulation d'un volume conséquent d'informations et à grande échelle et au machine learning. Le moteur de traitement de Spark peut fonctionner de façon autonome, en service cloud ou en surcouche de tout autre système informatique distribué populaire comme Kubernetes ou le précurseur de Spark, Apache Hadoop.

Ces trois systèmes ainsi que d'autres projets logiciels Apache font partie des moyens les plus fiables pour instaurer le Big Data et le mettre à profit dans votre organisation.

2) Choisir son outil Big Data : fonctionnalités essentielles

Un outil spécialisé, performant et flexible a le potentiel de considérablement simplifier le processus d'intégration Big Data. Il faut donc bien choisir son outil pour profiter de tous les avantages qu'il peut vous apporter. Voici quelques-unes des principales fonctionnalités et caractéristiques auxquelles vous devez faire attention avant de choisir votre outil d'intégration :

- ✓ **Le nombre important de connecteurs** : plus votre outil d'intégration possède de connecteurs prédéfinis, plus votre équipe IT gagnera du temps
- ✓ **Le caractère open-source** : les architectures open-source offrent généralement plus de possibilités et évitent les éventuels blocages avec vos fournisseurs.
- ✓ **La portabilité** : il est indispensable de se tourner vers des modèles cloud hybrides. Vous devez pouvoir l'intégration en une seule fois et pouvoir ensuite l'exécuter partout dans l'organisation (on-site, sur le cloud ou les deux à la fois).
- ✓ **La facilité d'utilisation** : l'outil d'intégration doit être facile à appréhender et à utiliser grâce à une interface graphique simplifiée permettant la visualisation de vos pipelines de data.
- ✓ **Une tarification transparente** : votre fournisseur d'outils d'intégration ne doit pas vous demander une somme supplémentaire pour augmenter le nombre de connecteurs ou le volume de données.
- ✓ **La compatibilité cloud** : la compatibilité avec le cloud (unique, multi-cloud ou hybride) doit être une fonctionnalité native de votre outil. Il doit également pouvoir utiliser l'informatique sans serveur pour minimiser le coût de votre management Big data.
- ✓ **La qualité et la gouvernance des données intégrées** : les données big data proviennent généralement de sources extérieures. Elles doivent pouvoir être traitées, nettoyées, agrégées et vérifiées avant d'être transmises aux utilisateurs professionnels. Dans le cas contraire, cela peut constituer un réel handicap pour l'entreprise. Assurez-vous donc que l'outil intègre une gestion de la qualité et de la gouvernance des données avant de le sélectionner.

III-1.10. Qu'est-ce que le big data dans l'industrie 4.0?

Le Big Data dans l'industrie 4.0 désigne l'utilisation massive de données complexes issues de diverses sources, comme les capteurs IoT, les systèmes de gestion de production, et les plateformes de clients. Ces données sont analysées et utilisées pour optimiser les processus, améliorer la prise de décision stratégique, augmenter l'efficacité opérationnelle et accélérer l'innovation dans le secteur manufacturier.

III-1.11. Quels sont les avantages du big data pour les entreprises dans l'industrie 4.0?

- ❖ **Optimisation des opérations :** Amélioration de l'efficacité et de la productivité grâce à l'automatisation et à l'optimisation des processus.
- ❖ **Prise de décision basée sur les données :** Des décisions plus éclairées et stratégiques grâce à des insights précis.
- ❖ **Personnalisation des produits :** Adaptation des offres aux besoins des clients en analysant les tendances et les préférences.
- ❖ **Maintenance prédictive :** Réduction des temps d'arrêt et des coûts de maintenance grâce à la prédiction des défaillances d'équipement.
- ❖ **Compétitivité accrue :** Les entreprises qui tirent pleinement parti du Big Data peuvent obtenir un avantage concurrentiel significatif.

III-1.12. Traitement et analyse des big data

L'ère de l'Industrie 4.0 est marquée par un afflux massif de données, dont le potentiel peut seulement être libéré grâce à des techniques d'analyse avancées. Avec l'analyse prédictive, l'apprentissage automatique et une puissante capacité de traitement des données, les entreprises peuvent transformer les données brutes en informations précieuses pour affiner leurs stratégies. L'analyse prédictive utilise des algorithmes et des modèles statistiques pour anticiper les tendances futures à partir des données historiques et actuelles. Cela permet aux industries d'identifier les opportunités d'amélioration et de réduire les risques, en prenant des décisions éclairées. Par exemple, la maintenance prédictive peut prévenir les pannes d'équipement avant qu'elles ne surviennent, économisant ainsi du temps et de l'argent.

L'apprentissage automatique, une branche de l'intelligence artificielle, est essentiel pour analyser les ensembles de données complexes et volumineux caractéristiques du Big Data. Les

systèmes équipés de cette technologie s'adaptent et apprennent de nouveaux motifs sans être explicitement programmés, conduisant à une optimisation continue des processus.

La puissance de traitement est également un facteur clé, permettant de gérer et d'analyser des quantités massives de données en temps réel. Cela se traduit par une analytique en temps réel qui offre aux décideurs une vue instantanée de la performance opérationnelle.

Pour les entreprises cherchant à intégrer ces capacités, Synox fournit une plateforme IoT, SoM2M#IoT, qui centralise la gestion des données IoT de manière sécurisée. Leur expertise en hardware, software et réseaux de communication constitue une ressource précieuse pour les entreprises de toutes tailles. De plus, l'accompagnement de projets IoT de Synox assure que les clients peuvent pleinement exploiter les avantages de l'analyse des Big Data avec des solutions adaptées et un soutien personnalisé.

L'analytique avancée, comme celle proposée par Synox, permet de déchiffrer les données industrielles complexes pour en extraire des insights actionnables. En intégrant l'analyse prédictive et l'apprentissage automatique dans leurs processus, les entreprises peuvent s'assurer une longueur d'avance dans un marché compétitif. L'adoption de ces technologies n'est pas sans défis, notamment en matière de cybersécurité. Les menaces informatiques en constante évolution nécessitent une attention soutenue pour protéger les données critiques. Heureusement, des solutions sont disponibles pour sécuriser efficacement les données dans cet écosystème interconnecté, comme le souligne la suite de cet article sur la cybersécurité et la protection des données dans l'Industrie 4.0 [22].

III-1.13. Automatisation et robotique : l'apport décisif du big data

L'avènement de l'Industrie 4.0 a marqué le début d'une nouvelle ère où l'intelligence artificielle (IA), l'automatisation et la robotique se conjuguent pour révolutionner les processus de production. Au cœur de cette transformation, le Big Data joue un rôle pivot en alimentant les systèmes avec des données précises et en temps réel, rendant possible une automatisation intelligente. L'influence du big data sur l'automatisation

1. Optimisation des processus :

Grâce à l'analyse de données massives, les machines peuvent prendre des décisions stratégiques pour optimiser les flux de travail, réduire les coûts et améliorer la qualité des produits.

2. Maintenance prédictive :

Les données collectées par les capteurs permettent de prédire les pannes avant qu'elles ne surviennent, réduisant ainsi les temps d'arrêt et prolongeant la durée de vie des équipements.

3. Personnalisation de la production :

Le Big Data autorise une personnalisation à grande échelle des produits en adaptant les paramètres de production aux besoins individuels des clients.

4. La robotique intelligente :

Avec le Big Data, la robotique s'élève à un niveau d'intelligence artificielle avancé. Les robots intelligents ne se contentent plus de tâches répétitives ; ils peuvent apprendre, s'adapter et travailler en collaboration avec les humains :

- **Apprentissage et adaptation :** Les robots équipés d'IA et alimentés par le Big Data peuvent apprendre de leur environnement et améliorer leurs performances au fil du temps.
- **Collaboration homme-machine :** La robotique avancée permet une interaction sans précédent entre les humains et les machines, augmentant la productivité et la créativité.
- **Sécurité et éthique dans l'automatisation :** La cybersécurité est essentielle dans une ère où les données sont une ressource précieuse. Protéger ces données contre les menaces informatiques est un enjeu majeur pour maintenir la confiance et l'intégrité des systèmes d'automatisation.
- **Systèmes sécurisés :** Les plateformes comme SoM2M#IoT de Synox offrent des solutions sécurisées pour la gestion des données IoT, essentielles pour les systèmes autonomes.
- **Éthique de l'IA :** Il est crucial d'inscrire l'automatisation et la robotique dans un cadre éthique respectueux de la société et des individus.

Pour intégrer ces technologies et gérer efficacement les données, des entreprises telles que Synox proposent des plateformes et des services d'accompagnement qui facilitent la transition vers des systèmes autonomes. Grâce à leur expertise, même les organisations sans compétences techniques internes peuvent tirer parti du Big Data pour optimiser leur automatisation.

La convergence du Big Data et de l'automatisation ouvre des horizons prometteurs. Elle permet aux entreprises de dépasser les limites traditionnelles de la production, en favorisant une fabrication autodirigée et réactive aux exigences du marché. En se plaçant au cœur de cette révolution, les entreprises peuvent non seulement améliorer leur efficacité mais aussi redéfinir leur positionnement stratégique sur le marché.

La visualisation des données et le reporting constituent la prochaine étape cruciale pour interpréter et communiquer efficacement les résultats issus de l'automatisation et de la robotique.

III-1.14. Cas d'usage concrets du Big Data dans l'industrie 4.0

L'application du Big Data dans l'industrie se traduit par des cas d'usage concrets et innovants, qui illustrent la manière dont les données massives transforment les processus industriels. Plusieurs grandes entreprises industrielles ont intégré ces technologies pour améliorer leur efficacité opérationnelle, leur maintenance et leur prise de décision.

1. Siemens : vers une production intelligente et connectée

Le site de production Siemens d'Amberg, souvent cité comme modèle de « smart factory », illustre parfaitement l'intégration du Big Data dans les processus industriels. Grâce à un réseau dense de capteurs installés sur les machines de production, Siemens collecte en temps réel des données sur des variables telles que la température, la pression, les cycles de fabrication ou encore les défauts de production.

Ces données sont ensuite analysées afin d'optimiser en continu les paramètres de production, de détecter les anomalies potentielles et de maintenir un haut niveau de qualité. L'usage du Big Data permet ainsi à Siemens d'atteindre un taux de conformité de plus de 99,998 %, tout en réduisant les arrêts de production non planifiés.

2. General Electric (GE) : la plateforme Predix et l'optimisation des actifs industriels

General Electric a développé Predix, une plateforme cloud dédiée à l'Internet industriel des objets (IIoT) et à l'analytique des données. Cette solution permet la collecte, le traitement et l'analyse de données issues d'équipements industriels complexes (turbines, moteurs, compresseurs), avec pour objectif l'amélioration de la performance opérationnelle.

Predix permet notamment la mise en place de stratégies de maintenance prédictive, la création de jumeaux numériques (digital twins) pour simuler et optimiser les comportements

des systèmes physiques, ainsi que la réduction des coûts d'exploitation. Cette approche renforce considérablement la fiabilité des installations, en particulier dans des secteurs critiques tels que l'aéronautique, l'énergie ou les infrastructures industrielles lourdes.

3. Airbus : une maintenance optimisée par l'intelligence des données

Dans le secteur aéronautique, Airbus s'appuie sur le Big Data et l'intelligence artificielle pour améliorer la gestion de la maintenance de ses appareils. L'entreprise a mis en place la plateforme Skywise, qui centralise les données techniques, opérationnelles et environnementales de ses avions, issues de multiples capteurs et systèmes embarqués.

Skywise permet aux compagnies aériennes et aux équipes de maintenance de surveiller en temps réel l'état des appareils, d'anticiper les pannes et de planifier les interventions de manière proactive. Cette analyse prédictive contribue à la réduction des temps d'immobilisation, à l'amélioration de la sécurité, ainsi qu'à une meilleure allocation des ressources de maintenance.

III-2. L'impression 3D

L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, s'est imposée au fil du temps comme une méthode de production fiable, largement adoptée dans de nombreux domaines d'activité. Mais en quoi consiste réellement cette technologie, quel est son mode de fonctionnement et dans quels contextes peut-elle être appliquée ?

De plus en plus prisée, cette méthode est aujourd'hui utilisée pour la création de preuves de concept, la réalisation de prototypes ou encore la fabrication de produits finaux. Les entreprises l'intègrent progressivement à différents stades de leur chaîne de production, modifiant parfois profondément leur stratégie pour tirer parti de cet atout technologique. Ingénieurs, designers et même passionnés exploitent cette innovation pour concevoir des solutions originales.

Le procédé repose sur la construction d'un objet physique en superposant des couches successives de matériau, à partir d'un fichier numérique 3D. Il permet ainsi de concrétiser un modèle virtuel en une pièce tangible, avec une grande précision et une grande liberté de conception [23].

L'impression 3D s'est imposée dans tous les grands secteurs d'activité. Les applications sont les plus perceptibles dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile, de la médecine et des soins dentaires. Les secteurs de l'éducation, de la construction, de la robotique, de la mode et de l'alimentation intègrent également l'impression 3D dans leurs activités.

L'avènement de l'industrie 4.0 contribue à l'essor rapide de l'impression 3D, pièce maîtresse de la fabrication additive. L'industrie 4.0 intègre de nouvelles technologies, notamment l'informatique en nuage, l'internet des objets (IoT), la fabrication additive, l'intelligence artificielle (IA) et l'analyse de données, dans leurs opérations de production et d'affaires. Ces technologies intégrées transformeront la manière dont les entreprises fabriquent des produits et des services [24].

III-2.1. L'histoire de l'impression 3D

Il y a une réelle histoire de l'impression 3D : La fabrication additive n'est pas une nouvelle technique de fabrication. Mais savez-vous qu'elle a été la toute première technologie développée ? La Stéréolithographie, ou SLA. La première tentative a été faite par une équipe d'ingénieurs français composée de Alain Le Méhauté, Olivier de Witte et Jean-Claude André. Mais à cause d'un manque de perspective côté business, le projet a été abandonné.

C'est au même moment que l'Américain Charles Hull, développe cette technologie et dépose un premier brevet pour la Stéréolithographie SLA en 1986. Il a fondé 3D Systems Corporation et en 1988, la SLA-1, son tout premier produit commercial, a été lancé.

Dans les années 90, les principales technologies ont été développées, comme la technologie de Dépôt de fil fondu, ou FDM. C'est donc à ce moment-là que les principales imprimantes 3D et les principaux outils de CAO ont été développés.

Depuis le début des années 2000, les évolutions de la fabrication additive se font de plus en plus rapides et de nouvelles applications sont trouvées tous les ans : l'impression 3D dans le médical, dans l'automobile, ou encore pour des applications mécaniques... Cette technologie offre de nouvelles opportunités dans tous les secteurs [23].

III-2.2. Logiciels d'impression 3D

Dès que votre modèle 3D est prêt, vous pouvez commencer à l'imprimer. C'est là que les logiciels d'impression 3D entrent en scène. Ces logiciels vous aident à imprimer en 3D en découpant votre modèle et en l'envoyant à votre imprimante.

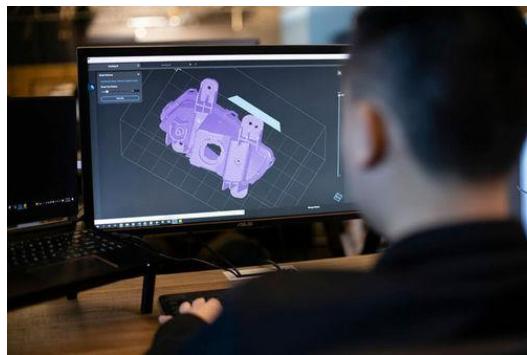


Figure 13 : Logiciel d'impression 3D de conception

Le logiciel de découpe est ce dont vous avez besoin pour assurer la communication entre votre modèle 3D et votre imprimante 3D. Autrement dit, les slicers traduisent votre fichier dans le format ou le langage de commande que votre imprimante 3D comprendra (pour beaucoup d'imprimantes, il s'agit du G-code, mais d'autres ont leur propre format). Un grand nombre de slicers sont disponibles gratuitement pour répondre aux besoins des utilisateurs à domicile. Ces programmes sont appelés slicers (littéralement « trancheurs ») car ils découpent votre modèle en une multitude de couches planes dont une imprimante 3D a besoin pour effectuer correctement son travail. Ce type de logiciel choisit également les meilleurs réglages d'impression tels que la hauteur des couches, la température, la vitesse d'impression et, en particulier pour les imprimantes FDM, la trajectoire optimale suivie par l'imprimante.

Différentes marques de logiciels d'impression 3D offre diverses fonctionnalités qui incluent le découpage, l'accès à distance à une imprimante 3D et bien d'autres, pour superviser, contrôler et gérer votre imprimante 3D tout en facilitant la communication entre les appareils. Quel que soit votre choix, tous les types de logiciels d'impression 3D font partie d'un écosystème. Utilisateur chevronné ou débutant, vous avez une multitude d'options open source ou payantes parmi lesquelles effectuer votre choix. Depuis quelques années, les logiciels d'impression 3D proposent des fonctionnalités novatrices et de nouvelles capacités à foison. Vous pouvez ainsi aisément trouver le bon outil pour un processus sans accroc [25].

III-2.3. Les principales technologies d'impression 3D [26]

De nombreuses technologies d'impression 3D sont déjà disponibles sur le marché, et un certain nombre sont en cours de développement. Chacune de ces technologies requiert un type de matériau d'impression 3D différent, allant du filament plastique en bobine (PLA, ABS, PEEK, ...) à la résine liquide photosensible ou encore la poudre (métallique, plastique, ...).

Chaque technologie d'impression 3D présente des avantages et est adaptée pour des applications particulières.

L'impression 3D repose sur un processus en plusieurs étapes :

- Conception numérique via des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur), où l'objet est modélisé en trois dimensions.
- Tranchage (slicing) : le modèle est découpé en fines couches horizontales qui guideront la tête d'impression.
- Fabrication couche par couche, à l'aide d'un procédé spécifique qui dépose, durcit ou fusionne la matière selon les instructions du modèle.

Il existe plusieurs procédés d'impression 3D adaptés aux contextes industriels :

- ✓ **Dépôt de fil ou extrusion (FFF et FDM)** : Un filament plastique est fondu et déposé sur une plateforme d'impression, formant l'objet couche après couche.
- ✓ **Photopolymérisation (SLA, DLP, LCD)** : Un laser ou une source de lumière solidifie une résine liquide et photosensible, point par point (SLA laser) ou couche par couche (DLP, LCD).
- ✓ **Fusion de poudre (SLS, SLM, DMLS)** : Un laser fusionne des particules de poudre point par point.

S'affranchissant des contraintes liées aux techniques de fabrication traditionnelles, l'impression 3D est la technologie idéale pour du prototypage rapide par exemple (un de ses usages le plus courant). Il existe aussi des imprimantes 3D industrielles, plus avancées, utilisées pour la fabrication en série d'objets finis et de pièces opérationnelles.

Le développement de l'impression 3D impacte déjà les méthodes et cycles de conception et de production dans de nombreux secteurs.

III-2.3.1. Extrusion et dépôt de fil fondu (FDM, FFF)

❖ **Dépôt de fil fondu : FDM (Fused Deposition Modeling) et FFF (Fused Filament Fabrication)**

La technologie d'impression 3D par dépôt de fil fondu, aussi appelée extrusion, utilise du filament plastique (typiquement PLA ou ABS) comme consommable. Il s'agit de la technique d'impression 3D la plus répandue.

Le filament est chauffé et fondu dans la tête d'impression (aussi appelé extrudeur) de l'imprimante 3D puis ressort à travers une fine buse. L'extrudeur se déplace horizontalement selon deux axes (les axes X et Y) en même temps que la plateforme d'impression se déplace sur un axe vertical Z, sauf lorsqu'il s'agit d'une imprimante 3D delta, auquel cas le lit d'impression est fixe.

L'imprimante 3D dépose le filament fondu par couches successives, les unes sur les autres, pour former l'objet en 3D. Lorsqu'une couche est complète, le plateau d'impression s'abaisse légèrement sur l'axe Z (vertical) et le processus d'extrusion reprend en déposant une nouvelle couche de filament fondu au-dessus de la première. Les couches ainsi créées sont fusionnées entre elles par le plastique qui se solidifie rapidement. L'empilement des couches de matière forme l'objet final.

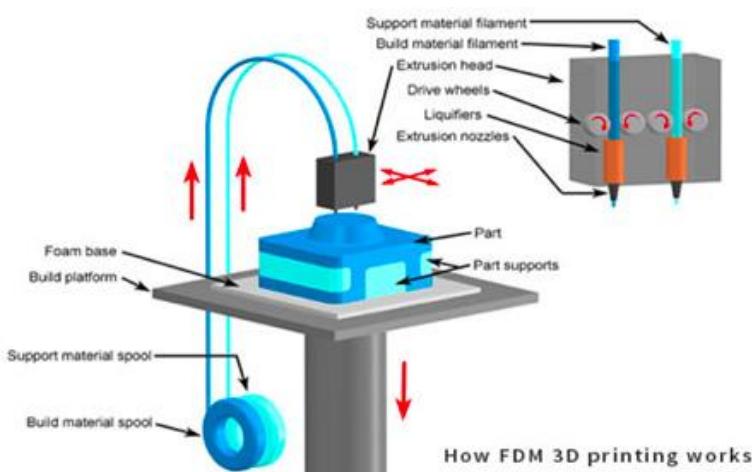


Figure 14: Le processus d'impression 3D par dépôt de filament fondu

La précision et la qualité du résultat final dépendent entre autres de l'épaisseur de couche minimale offerte par l'imprimante 3D (plus les couches sont fines, plus la résolution est importante et le résultat précis). Les matériaux d'impression 3D compatibles avec les imprimantes 3D à dépôt de fil sont des filaments plastiques sous forme de bobines (en général du PLA ou de l'ABS). Il existe aussi des filaments pour imprimantes 3D dits exotiques,

contenant un certain pourcentage de métal ou de bois, ou des propriétés particulières (flexible, transparent, phosphorescent...).

Cette technologie est également compatible avec d'autres matériaux comme le silicone, l'argile, les polymères haute température, entre autres.

– **Directed Energy Deposition (DED)**

L'impression 3D par dépôt d'énergie directe ou « Directed Energy Deposition », parfois notée « Direct Energy Deposition » (DED), est une technique d'impression 3D avancée utilisée uniquement par quelques imprimantes 3D industrielles. Nous avons choisi de la catégoriser en tant que technologie d'impression 3D par extrusion car avec cette technologie, le matériau d'impression est poussé vers une puissante source d'énergie (en général un laser ou faisceau d'électrons) pour être fondu et fusionné, formant ainsi l'objet.

Une imprimante 3D DED classique est constituée d'une buse montée sur un bras multi-axes qui dépose de la matière fondu sur une surface, où elle se solidifie. Le processus est en cela similaire à celui de l'extrusion, la différence étant que la buse se déplace dans de multiples directions et non pas seulement le long de deux axes. Le matériau d'impression peut être déposé selon n'importe quel angle et est fondu en même temps qu'il est déposé par un laser ou un faisceau à électrons.

La technologie de DED peut être utilisée avec des polymères ou des matériaux céramiques mais est le plus souvent utilisée avec des poudres de métal. L'impression 3D est généralement utilisée pour réparer ou ajouter des composants à des pièces existantes.

III-2.3.2. Résine et photopolymérisation (SLA, DLP)

➤ **Les imprimantes 3D à résine, comment ça marche ?**

Les imprimantes 3D à résine, utilisant les technologies SLA ou DLP, sont basées le processus de photopolymérisation. Une résine photosensible contenue dans un réservoir de l'imprimante 3D, est polymérisée (solidifiée) par une source de lumière (laser ou projecteur), couche par couche.

Les imprimantes 3D SLA et DLP utilisent de la résine liquide photosensible, c'est-à-dire des résines qui réagissent en se solidifiant lorsqu'elles sont exposées à certains rayons lumineux.

La stéréolithographie laser utilise, comme son nom l'indique, un laser pour solidifier la résine point par point, tandis que la stéréolithographie à projection de lumière (DLP, LCD, MSLA, ...) sont capables de solidifier des couches entières en une seule fois.

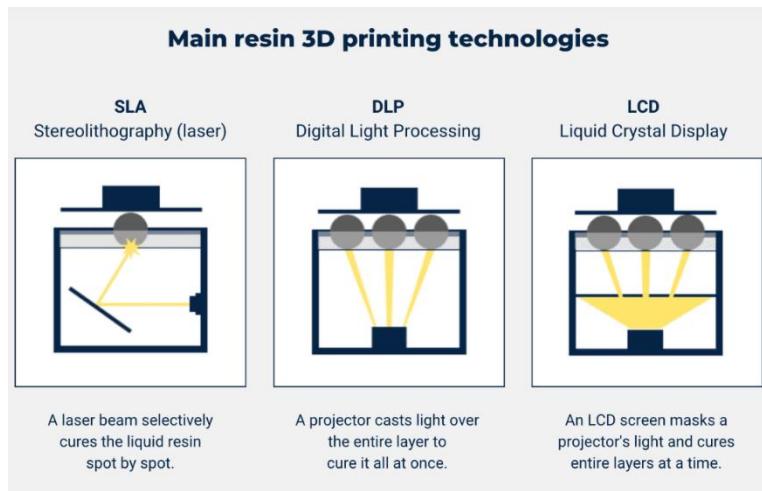


Figure 15: Technologies SLA laser, DLP, LCD (MSLA) expliquées.

Les imprimantes 3D SLA ou DLP sont recommandées dans les cas où l'objet à imprimer comporte des détails fins et requiert une résolution d'impression élevée ainsi qu'un aspect lisse pour la surface de l'objet. Les imprimantes 3D résine sont ainsi beaucoup utilisées pour la production de moules en joaillerie ou dans l'industrie dentaire.

➤ Comment fonctionne une imprimante 3D SLA ?

Le procédé d'impression 3D par stéréolithographie laser, connu sous l'abréviation SLA, est un processus de fabrication additive utilisé dans les imprimantes 3D SLA à résine. Un faisceau de rayons UV est projeté par un laser pour polymériser (c'est-à-dire solidifier) une résine photosensible contenue dans un bac de l'imprimante 3D et ainsi former un objet solide, couche par couche.

Dans une imprimante 3D SLA, un réservoir contient le matériau consommable, la résine photosensible qui réagit à certains types de rayons lumineux. Le laser « dessine » l'objet 3D à imprimer dans le bac à résine, solidifiant ainsi la résine point par point puis couche par couche, en suivant le modèle du fichier 3D d'origine.

L'impression 3D SLA permet d'obtenir des résultats d'une grande finesse à la texture lisse, contrairement à l'impression 3D en FFF ou FDM où les couches de matières sont visibles sur l'objet final.

➤ **Les imprimantes 3D DLP (Digital Light Processing)**

La technologie d'impression DLP (Digital Light Processing) est une autre technologie utilisée par les imprimantes 3D à résine. L'objet est formé par la solidification de la résine photosensible grâce aux rayons UV émis par un projecteur (processus de photopolymérisation).

La résolution du projecteur détermine in fine la résolution de l'impression 3D. Les imprimantes 3D DLP sont de plus en plus courantes, notamment car leur vitesse d'impression est supérieure aux imprimantes 3D SLA, grâce au projecteur qui solidifie d'un coup une surface formant une couche de l'objet tandis que le laser utilisé en SLA fonctionne point par point.

➤ **Les imprimantes 3D LCD (ou MSLA, stéréolithographie masquée)**

Ces imprimantes 3D utilisent un écran LCD comme sorte de pochoir au-dessus d'une autre source de lumière (LED, UV, ...). Elles peuvent, comme les imprimantes 3D DLP, solidifier des couches entières à la fois.

➤ **SLA vs DLP : comparaison des technologies d'impression 3D résine**

La principale différence entre les imprimantes 3D SLA et DLP est la manière dont la résine photosensible est polymérisée (solidifiée). Les imprimantes 3D DLP solidifient la résine couche par couche avec un projecteur tandis que les imprimantes SLA solidifient la résine point par point avec un laser.

La technique SLA est plus précise et potentiellement plus lente que la DLP. Les lasers sont aussi plus coûteux et difficiles à entretenir au contraire des projecteurs que l'on peut trouver facilement et qui utilisent des lampes facilement remplaçables.

III-2.3.3. Frittage de poudre et fusion (SLS, SLM...)

Certaines imprimantes 3D, en général des machines industrielles, utilisent comme consommable des matériaux sous forme de poudre (poudre de métal par exemple). Les principales technologies d'impression 3D basées sur de la poudre sont le frittage sélectif par laser (connu sous le nom SLS pour Selective Laser Sintering) et la fusion sélective par laser (ou SLM, pour Selective Laser Melting).

Ces imprimantes 3D SLS ou SLM sont en général destinées à des applications industrielles comme la production de pièces complexes en métal pour l'aviation.

- **Imprimantes 3D SLS : frittage sélectif par laser (Selective Laser Sintering)**

La technologie d'impression 3D de frittage sélectif par laser (SLS) est basée sur l'utilisation d'un laser pour friter un matériau sous forme de poudre. L'énergie dégagée par le laser permet d'agglomérer entre eux les grains de matière en poudre (plastique, métal, céramique...) pour former une structure solide, sans toutefois les fusionner.

Les imprimantes 3D SLS sont dotées d'un bac où est contenu la poudre consommable. Le laser, piloté par le logiciel de l'imprimante 3D, vient « tracer » dans le bac à poudre la forme de l'objet à imprimer, formant ainsi l'objet désiré, couche par couche.

- **Imprimantes 3D SLM : fusion laser (Selective Laser Melting)**

Les imprimantes 3D par fusion laser, ou SLM, utilisent un procédé proche de la technologie par frittage sélectif de poudre : la différence est que pour l'impression 3D par fusion laser, le matériau en poudre est fusionné et pas simplement fritté par le laser. Le laser va ainsi faire fusionner les particules de poudres pour former un objet solide. Les imprimantes 3D SLM sont utilisées notamment pour imprimer en 3D des pièces en métal dans le cadre d'usages industriels en aéronautique ou dans le secteur médical pour la fabrication de couronnes dentaires en métal, par exemple.

- **Imprimantes 3D EBM (Electron Beam Melting)**

La technologie d'impression 3D EBM est basée sur le même principe que la technologie par fusion laser (SLM) : le matériau sous forme de poudre (métal ou plastique) est solidifié par une source d'énergie, dans ce cas un faisceau d'électrons (« electron beam »). Ce faisceau d'électron fait fusionner les grains de poudre pour former l'objet solide.

- **Autres catégories d'imprimantes 3D à poudre (DMLS, SLM, SHS, LM...)**

Les imprimantes 3D qui utilisent de la poudre comme matériau d'impression sont principalement destinées à des usages industriels, comme le prototypage rapide ou la fabrication directe de pièces fonctionnelles. Il existe toutefois des imprimantes 3D SLS compactes. Au-delà des principales technologies d'impression 3D par frittage laser sélectif (SLS) ou fusion laser (SLM), il existe de nombreuses variantes basées sur des principes assez similaires : frittage laser (Laser Sintering ou LS), fusion laser (Laser Melting ou LM), frittage sélectif par chaleur

(Selective Heat Sintering ou SHS), frittage laser de métal (Direct Metal Laser Sintering ou DMLS), ou encore plâtre lié (Plaster-based 3D Printing ou PP).

Les différences entre ces technologies de fabrication additive concernent la manière dont le matériau en poudre est fondu ou fritté. Pour l'EBM, l'EBAM ou la technologie SLM, les gains de poudre sont entièrement fondus, tandis qu'avec une imprimante 3D SLS ou LS, les grains de poudre sont agglomérés par frittage (« sintering ») et non pas fondus complètement, pour former un objet solide.

Il existe de nombreux types de matériaux en poudre compatibles avec les technologies SLS ou SLM comme des poudres métalliques (alliages, titanes,), des poudres thermoplastiques, des poudres céramiques... Ce grand choix de matériaux aux propriétés avancées font que les imprimantes 3D à poudre (SLS et SLM principalement) sont de plus en plus utilisées dans des secteurs industriels comme l'aéronautique ou encore l'automobile, qui requièrent souvent l'utilisation de pièces métalliques complexes devant offrir une grande résistance.

III-2.4. À quoi servent les imprimantes 3D ? [27]

Au fil de ses près de quarante ans d'existence, l'impression 3D s'est imposée comme un levier clé de la quatrième révolution industrielle. Voici un aperçu des domaines qu'elle transforme profondément :

➤ **Prototypage et fabrication accélérés**

L'un des usages historiques de l'impression 3D est le prototypage rapide. Dès ses débuts, cette technologie a permis de produire des pièces en quelques heures seulement, contre plusieurs semaines auparavant. L'évolution des matériaux et des procédés a ouvert la voie à la fabrication rapide, où des pièces fonctionnelles finales peuvent être réalisées directement à partir des prototypes.

➤ **Industrie automobile**

Dans le secteur automobile, cette technologie offre une grande flexibilité. Elle réduit les délais de développement, optimise les coûts de production et permet la personnalisation des modèles. L'impression 3D est également utilisée pour concevoir des pièces innovantes ou produire des pièces détachées à la demande.

➤ Aéronautique et spatial

L'aviation a été l'un des premiers domaines à adopter l'impression 3D dès la fin des années 1980. Des entreprises comme Airbus ou Boeing s'en servent pour créer des pièces légères, des prototypes fonctionnels et des outils spécialisés. Elle contribue aussi à la réduction du poids des avions, ce qui se traduit par une moindre consommation de carburant et une diminution des émissions polluantes.

➤ Produits de consommation

L'impression 3D permet une personnalisation poussée à moindre coût, ce qui en fait une solution idéale pour les industries orientées vers les besoins du client. Des secteurs comme l'électronique, les jouets, la mode ou les équipements sportifs y recourent pour concevoir des produits uniques et tester rapidement de nouvelles idées.

➤ Applications médicales

Dans le domaine de la santé, l'impression 3D est utilisée pour fabriquer des prothèses sur mesure, des implants, des orthèses et même des pilules personnalisées. Une de ses branches, la bio-impression, permet de reproduire des tissus biologiques couche par couche à partir de « bioencres ». Grâce à cette technologie, les prothèses sont aujourd'hui plus accessibles, mieux adaptées et produites à moindre coût. La dentisterie tire également parti de cette avancée pour fabriquer des dispositifs sur mesure.

➤ Bâtiment et travaux publics (BTP)

L'impression 3D dans le secteur du bâtiment permet de réaliser des structures avec un niveau de complexité et de précision inédit. Elle facilite la production de composants imprimés à partir de béton, de mousse ou de matériaux polymères. Certains projets vont jusqu'à imprimer directement des bâtiments entiers. Des réalisations concrètes ont déjà vu le jour en Chine, aux Émirats arabes unis ou aux Pays-Bas, avec la construction de logements et même de ponts piétons.

➤ Secteur agroalimentaire

Bien que limitée à ce jour, l'impression 3D alimentaire fait son chemin, notamment dans la gastronomie et la recherche. Elle est utilisée pour concevoir des équipements de production ou créer des plats personnalisés à partir de purées, chocolats ou fromages grâce à

l'extrusion de matière comestible. Des projets sociaux misent aussi sur cette technologie pour produire des aliments à base de protéines végétales ou lutter contre la malnutrition.

III-2.5. Applications concrètes dans l'industrie

Plusieurs grands groupes industriels ont intégré l'impression 3D dans leur chaîne de valeur, avec des résultats probants :

Airbus utilise des pièces imprimées en 3D pour alléger ses avions (support de câbles, fixations, carters...). Un exemple notable est l'A350 XWB, qui contient plus de 1 000 pièces issues de la fabrication additive, avec une réduction de poids significative et un gain en efficacité énergétique.

General Electric (GE) a révolutionné la fabrication de composants moteurs avec l'impression 3D. Le LEAP engine, développé par CFM International (joint-venture entre GE et Safran), utilise des injecteurs de carburant imprimés en métal, 25 % plus légers et cinq fois plus résistants que leurs homologues usinés traditionnellement.

BMW a intégré l'impression 3D dans la fabrication de guides d'assemblage et d'outils de production personnalisés, ce qui améliore l'ergonomie et la précision sur ses lignes de montage. L'entreprise explore également l'utilisation de la fabrication additive pour les pièces de carrosserie personnalisées dans ses modèles haut de gamme.

Dans le domaine de **la maintenance industrielle**, l'impression 3D permet de reproduire rapidement des pièces détachées difficiles à trouver ou obsolètes, ce qui réduit les temps d'arrêt et prolonge la durée de vie des équipements.

III-2.5. Perspectives d'évolution

L'impression 3D évolue rapidement vers une intégration totale dans les systèmes de production intelligents. Des synergies fortes sont observées avec :

- ✓ **L'IoT industriel**, pour le contrôle en temps réel du processus d'impression,
- ✓ **Le Big Data**, pour l'analyse des paramètres d'impression et l'optimisation des pièces,
- ✓ **L'intelligence artificielle**, pour la génération automatique de géométries optimisées.

À terme, cette technologie s'inscrit dans une logique de fabrication distribuée, où la production peut être relocalisée, décentralisée, et ultra-flexible. Elle renforce ainsi la résilience

des chaînes d'approvisionnement tout en répondant aux enjeux environnementaux et de personnalisation.

III-2.6. Les principaux secteurs industriels de l'impression 3D [28]

L'impression 3D a révolutionné le paysage de la fabrication industrielle en offrant une amélioration de la flexibilité et de la personnalisation. L'impression 3D doit désormais s'adapter en fonction des différents besoins des secteurs industriels.

En permettant la création de composants sur mesure et précis, l'impression 3D a surpassé les limites traditionnelles de la production industrielle. Elle a non seulement ouvert de nouvelles perspectives en termes de conception, mais elle a également favorisé l'émergence de chaînes de production plus agiles et adaptables. L'intégration de cette technologie a contribué à redéfinir les normes de l'efficacité opérationnelle, permettant aux entreprises d'ajuster rapidement leur production pour répondre aux différents besoins.

Elle est devenue un levier majeur de l'industrie 4.0, favorisant la numérisation et la réactivité des processus industriels.

L'impression 3D est donc déjà fortement présentes dans plusieurs secteurs industriels, répondant à différents besoins. Nous vous présentons aujourd'hui ces principaux secteurs qui intègrent désormais l'industrie 4.0.

1) Le secteur mécanique

Dans le domaine de l'industrie mécanique, la fiabilité des pièces utilisées est un aspect essentiel pour assurer la qualité et la sécurité de l'industrie.

L'impression 3D offre à ce secteur la possibilité de fabriquer des prototypes sur-mesure, permettant d'évaluer les qualités techniques d'un modèle avant sa production définitive. En effet, les ingénieurs et les concepteurs mécaniques peuvent rapidement affiner leurs conceptions, en testant des prototypes physiques fonctionnels et personnalisés pour évaluer leurs performances et leurs fonctionnalités. Cette approche permet de détecter et de résoudre les problèmes potentiels dès les premières étapes de développement. Ce qui se traduit par des cycles de conception plus courts et une amélioration globale de l'efficacité du processus de fabrication.

Pour aller plus loin, il existe aujourd'hui des imprimantes 3D industrielles qui regroupent en une seule machine plusieurs procédés de fabrications : les imprimantes 3D multi-procédés.

Ces machines permettent de regrouper des procédés additifs et soustractifs. En plus de l'impression 3D, vous pouvez bénéficier de l'usinage, et même de la gravure laser.

Pour la création de prototypes, les machines 3-en-1 permettent :

- D'améliorer la précision et la finition de vos pièces personnalisées en imprimant votre pièce en 3D et en la ré-usinant directement dans la même machine.
- Mais également de fabriquer la version finale de vos prototypes directement en outillage. En effet, une fois que vos prototypes, imprimés en 3D sont validés, vous pouvez alors réaliser l'outillage final en usinage à partir d'un métal brut sur la même machine.
- Enfin, de répertorier et cataloguer les différentes versions en gravant directement sur les pièces fabriquées.

Apprenez-en davantage sur les imprimantes 3D multi-procédés en découvrant notre produit EVA, l'imprimante 3D multi-procédés.

Cette flexibilité et cette efficacité accrue permettent aux entreprises du secteur mécanique de réduire les coûts, d'accélérer la mise sur le marché des produits et d'améliorer leur compétitivité.



Figure 16: Support de roulement - Pièce usinée et pièce imprimée en 3D puis gravée

2) Le secteur aéronautique

Dans l'industrie aéronautique, la précision et la fiabilité sont des critères essentiels, jouant un rôle déterminant dans la conception, la fabrication et le fonctionnement des composants aérospatiaux. Ces exigences élevées visent à garantir la sécurité, la performance optimale et la durabilité des équipements utilisés dans ce secteur stratégique.

L'impression 3D, tout comme dans le secteur mécanique, offre la possibilité de fabriquer rapidement des prototypes fonctionnels, réduisant ainsi le processus de développement. Mais ce qui va réellement démarquer ce secteur, c'est sa haute exigence en terme de précision. Comme présenté précédemment, l'utilisation d'une imprimante 3D à plusieurs procédés va permettre d'optimiser les productions.

Cette fois-ci, nous mettons seulement en avant 2 procédés : l'impression 3D et l'usinage. En effet, la combinaison de l'impression 3D puis le ré-usinage d'une même pièce sur la même machine permet d'obtenir des états de surface fins (R_a jusqu'à $0,3\mu m$) et des tolérances dimensionnelles précises à $0,05mm$. L'utilisation de ces procédés offre un avantage de rapidité et d'efficacité, notamment lorsqu'ils sont utilisés automatiquement et en simultané sur la même machine (pour en découvrir davantage : LUCY, l'imprimante 3D hybride).



Figure 17: Moule hybride

3) Le secteur de la défense

L'utilisation dans le domaine de la défense permet de repousser les limites de la conception et de la fabrication d'équipements, de composants et de pièces spécifiques aux besoins militaires.

Ici la force de la personnalisation va résider dans la création de pièces sur mesure répondant aux exigences spécifiques de leurs missions. Que ce soit des dispositifs de fixation, des pièces d'équipement ou des composants spéciaux, l'impression 3D permet de produire des pièces adaptées aux besoins tactiques et opérationnels.

La légèreté, la précision et la résistance des pièces fabriquées sont également des atouts importants dans le domaine de la défense. La robustesse des pièces usinées et la complexité des

pièces imprimées en 3D permettent une meilleure adaptation et favorise le maintien en condition opérationnelle du matériel militaire.

Les matériaux utilisés peuvent être choisis pour offrir des propriétés spécifiques, tels que la résistance aux chocs, la résistance aux vibrations ou la résistance aux températures extrêmes. Cela permet la création de pièces durables et fiables, capables de résister aux conditions difficiles auxquelles sont confrontés les équipements militaires.

4) Le secteur de l'éducation

L'impression 3D offre au secteur de l'éducation une réponse aux nouveaux enjeux de demain, notamment dans le contexte de l'industrie 4.0. Grâce à sa polyvalence et à l'hybridation de plusieurs procédés au sein d'une même machine, les établissements éducatifs ont accès à une solution complète pour l'apprentissage et la formation.

De plus, l'utilisation des imprimantes 3D offre une simplicité dans son utilisation. A titre d'exemple, l'ensemble de nos gammes machines sont équipés du logiciel de pilotage N-Play. Grâce à son interface intuitive, ces machines offrent aux fablabs d'écoles d'ingénieurs, universités et centres de formation un outil polyvalent favorisant l'aboutissement de projets étudiants.

Cette approche pédagogique favorise une meilleure compréhension des technologies émergentes, tout en préparant les étudiants à relever les défis de l'industrie.

5) Le secteur automobile

Le secteur de l'automobile utilise aujourd'hui largement l'impression 3D. A l'origine, les pièces les plus fréquemment imprimées comprenaient des supports et des prototypes, nécessitant une rigidité, une solidité et une durabilité particulières. Cependant, les imprimantes 3D professionnelles sont aujourd'hui également utilisées pour produire des pièces finales renforcées par des fibres hautement résistantes.

Dans l'industrie automobile, l'impression 3D offre de multiples avantages pour la conception, le prototypage et la fabrication de pièces automobiles. Comme pour le secteur mécanique, les concepteurs peuvent créer des prototypes de pièces automobiles à l'identique des pièces moulées/injectées avec une grande précision et une grande rapidité, leur permettant ainsi de tester et d'affiner leurs conceptions plus rapidement qu'avec les méthodes traditionnelles.

De plus, la capacité des imprimantes 3D à produire des pièces de rechange sur mesure permet de réduire les stocks coûteux de pièces détachées. Les fabricants peuvent utiliser l'impression 3D pour fabriquer des pièces spécifiques en fonction des besoins comme par exemple des pièces d'anciens programmes.

Grâce à l'impression 3D hybride, les fabricants peuvent expérimenter rapidement de nouvelles idées et les intégrer dans leurs processus de développement, ce qui contribue à l'innovation et à l'amélioration continue dans l'industrie automobile.



Figure 18: Capot de différentiel

6) Le secteur nautique

L'un des principaux avantages de l'impression 3D dans le domaine nautique réside dans sa capacité à produire des pièces sur mesure adaptées aux besoins spécifiques des engins nautiques.

Une fois de plus, l'intégration de plusieurs procédés, additifs et soustractifs, dans une imprimante 3D permet d'offrir une polyvalence et une optimisation de la production. En effet, cela offre la possibilité de créer des pièces complexes et légères, optimisées en termes de poids et de performance. Cette légèreté est particulièrement bénéfique pour les engins nautiques, car elle contribue à réduire la consommation de carburant, à améliorer l'efficacité énergétique et à augmenter l'autonomie.

De plus, les pièces fabriquées peuvent être conçues de manière à résister aux conditions maritimes exigeantes, telles que la corrosion, les vibrations et les impacts, assurant ainsi une durabilité et une fiabilité accrues.

L'impression 3D hybride offre une grande flexibilité en termes de matériaux utilisables. Que ce soit des polymères, des composites ou même des métaux, elle est capable de travailler avec une large gamme de matériaux adaptés aux applications nautiques spécifiques. Cela permet aux fabricants du secteur d'explorer de nouvelles possibilités, d'actualiser leurs développements et d'utiliser des matériaux innovants pour améliorer les performances, la résistance et la durabilité de leurs produits.



Figure 19: Moule imprimé en 3D et usiné

L'impression 3D, et l'intégration de plusieurs procédés en une seule machine, se positionne comme une solution polyvalente et innovante pour de nombreux secteurs industriels. Que ce soit dans le domaine de la mécanique, de l'aéronautique, de la défense, du médical, de l'automobile ou du nautique.

Les imprimantes 3D industrielles offrent une forte flexibilité et personnalisation grâce à leur avantage hybride. Leur potentiel à réaliser des pièces en grand format, leur polyvalence, ainsi que leur facilité d'utilisation, en font un outil indispensable pour les entreprises à la recherche de performances et d'autonomie dans leurs processus de fabrication industrielle. Les entreprises peuvent s'adapter aux exigences spécifiques de leur secteur tout en restant compétitives dans un environnement en constante évolution.

III-2.7. L'avenir de l'impression 3D

Ces dernières années, l'impression 3D est passée du statut de technologie émergente à celui de véritable levier de transformation industrielle. Grâce aux nombreuses recherches et expérimentations menées, elle tend à s'ancrer de manière durable dans notre quotidien. Son champ d'application semble sans limite, allant de la fabrication de gadgets et d'objets

artistiques jusqu'à la production de pièces aéronautiques, voire d'organes bio-imprimés destinés à la transplantation.

D'abord réservée aux entreprises spécialisées, la fabrication additive s'ouvre désormais à un public plus large, notamment grâce à la démocratisation des imprimantes 3D et à la simplification des logiciels de modélisation. Que ce soit dans l'enseignement, le design, le bricolage ou encore les projets personnels, de plus en plus d'utilisateurs peuvent concevoir des objets sur mesure, sans recourir à une infrastructure industrielle lourde.

Cependant, malgré sa montée en puissance, cette technologie ne s'est pas encore imposée à grande échelle dans tous les foyers ou toutes les entreprises. Cela s'explique en partie par des freins persistants, comme les contraintes liées aux étapes de préparation et de finition, ainsi que par la diversité encore limitée des matériaux disponibles. Néanmoins, plusieurs obstacles importants, notamment les coûts des équipements et le manque de compétences techniques, tendent à diminuer, ce qui ouvre des perspectives prometteuses pour son adoption future.

L'impact de l'impression 3D sur les processus de fabrication, les chaînes logistiques et la liberté de conception est déjà considérable. Elle contribue à rendre la production plus agile, rapide, durable et adaptée aux besoins spécifiques de chaque utilisateur.

Avec une meilleure accessibilité, une efficacité accrue et des produits personnalisables, l'impression 3D est appelée à jouer un rôle majeur dans l'industrie de demain. Elle s'impose peu à peu comme un pilier de la transformation numérique et pourrait, à terme, devenir un vecteur essentiel de l'économie mondiale [29].

III-2.8. L'importance de l'impression 3D dans l'industrie 4.0

L'impression 3D, ou fabrication additive, constitue l'un des piliers technologiques de l'industrie 4.0. Pour bien comprendre sa contribution, il convient d'abord de saisir la notion d'industrie 4.0, aussi appelée quatrième révolution industrielle. Celle-ci se caractérise par l'automatisation avancée et la numérisation des processus industriels, entraînant une refonte complète des modes de production et des pratiques organisationnelles des entreprises.

Chacune des révolutions industrielles précédentes a été marquée par l'introduction de technologies disruptives. Ces évolutions ont, à chaque fois, transformé les structures économiques et les dynamiques sociales. Les XIX^e et XX^e siècles ont ainsi vu naître trois

grandes révolutions industrielles, chacune ayant apporté des changements profonds dans les modes de vie et de production.

Depuis environ 2014, un nouveau tournant s'est amorcé, porté par le développement rapide des technologies de l'information et de la communication (TIC). Ce contexte a permis l'émergence de l'industrie 4.0, fondée sur l'intégration étroite des systèmes physiques, numériques et biologiques. Ces éléments interconnectés constituent un environnement de production intelligent, où machines, objets et humains collaborent en temps réel.

L'industrie 4.0 repose sur un ensemble de technologies de pointe qui visent à rendre les systèmes de production plus souples, autonomes et performants. Parmi ces technologies figurent : l'impression 3D, l'Internet des objets (IdO), les systèmes cyberphysiques (CPS), le cloud computing, la cybersécurité, la blockchain, l'intelligence artificielle, le machine learning, le deep learning et l'exploitation des mégadonnées. Ensemble, ces outils forment l'ossature de ce qu'on désigne aujourd'hui comme « l'usine intelligente ».

Dans ce cadre, l'impression 3D joue un rôle central. Elle permet de produire des objets complexes, personnalisés et fonctionnels à la demande, tout en réduisant les délais de fabrication, les coûts et les pertes de matière. Elle s'inscrit ainsi pleinement dans la logique de transformation numérique portée par l'industrie 4.0, en rendant les processus industriels plus agiles, connectés et durables [30].

III-3. L'Internet des objets

En 2022, le marché français de l'Internet industriel des objets (IIoT, pour Industrial Internet of Things) a été estimé à environ 2,5 milliards d'euros. D'après une étude publiée en 2024 par Markets and Markets, ce secteur pourrait atteindre une valeur mondiale de 1 100 milliards de dollars d'ici 2025. Cette croissance rapide reflète l'importance stratégique du IIoT dans un contexte de transition numérique et écologique, où la compétitivité dépend de la capacité d'innovation des entreprises.

L'Internet des objets appliqué à l'industrie transforme en profondeur les modes de fonctionnement des organisations. Il repose sur la connexion intelligente d'équipements, de capteurs et de systèmes, permettant un échange constant de données entre les machines et les plateformes numériques. Grâce à cette interconnexion, les entreprises industrielles peuvent

optimiser leurs processus de production, améliorer la maintenance prédictive, accroître la sécurité sur les sites et gagner en efficacité opérationnelle.

De la captation en temps réel des données jusqu'à leur traitement par des outils d'analyse avancés, l'IoT permet d'introduire une plus grande agilité dans la gestion des activités industrielles. Il s'agit donc d'un levier technologique essentiel pour accompagner les mutations vers une industrie plus intelligente, connectée et durable [31].

III-3.1. Qu'est-ce que l'Internet des objets (IoT) ?

L'Internet des objets (IoT) désigne un réseau d'objets physiques et de dispositifs intelligents capables de collecter, transmettre et recevoir des données via Internet, grâce à des capteurs, des logiciels embarqués et d'autres technologies numériques. Ces objets connectés interagissent entre eux ou avec des systèmes centralisés, ouvrant la voie à une automatisation et à une optimisation avancée des processus dans divers domaines.

Lorsqu'il est appliqué au secteur industriel, on parle alors d'Internet industriel des objets (IIoT). Cette déclinaison de l'IoT est utilisée dans des secteurs tels que la santé, l'énergie, la logistique, ou encore l'automobile. Grâce aux objets connectés et aux capteurs intelligents, l'IIoT permet d'améliorer la performance opérationnelle, d'optimiser la consommation des ressources et d'anticiper les besoins en maintenance.

Le développement de cette technologie connaît une croissance exponentielle. Les prévisions indiquent que le marché mondial de l'IoT industriel pourrait dépasser les 27 milliards d'appareils connectés dans un avenir proche. Cette évolution s'inscrit dans le cadre plus large de l'industrie 4.0, où l'interconnexion des systèmes et l'analyse des données en temps réel deviennent des leviers de compétitivité essentiels pour les entreprises [32].

III-3.2. Définition et différences avec l'IoT classique

Contrairement à l'IoT grand public, l'IIoT répond aux exigences des environnements industriels, avec des dispositifs résistants aux conditions extrêmes. Ainsi ThyssenKrupp utilise l'IIoT dans la maintenance prédictive de ses machines : les systèmes installés anticipent les pannes potentielles, réduisent les interruptions coûteuses, optimisent la durée de vie des équipements.

ThyssenKrupp, géant de l'industrie de l'acier et des solutions technologiques, utilise l'Internet des objets dans le but de révolutionner la maintenance de ses ascenseurs. Grâce à des

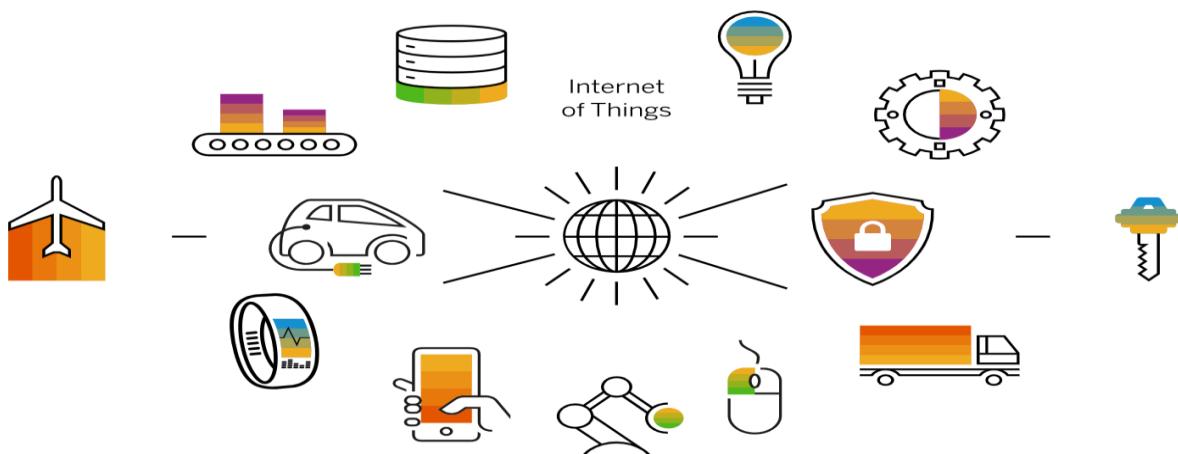
capteurs intelligents, l'entreprise surveille en temps réel l'état de milliers d'ascenseurs à travers le monde. Ils recueillent des données importantes, ensuite transmises à une plateforme cloud.

Les informations sont analysées par des algorithmes d'intelligence artificielle, elles permettent de prédire les pannes. Cela garantit une disponibilité maximale des équipements, réduit les interruptions imprévues, optimise l'efficacité des interventions de maintenance. Résultat : une réduction significative des coûts de maintenance avec une amélioration de la satisfaction client grâce à une fiabilité accrue.

L'approche IIoT de ThyssenKrupp démontre comment la technologie connectée peut transformer des opérations complexes en solutions durables [33].

III-3.3. Définition détaillée de l'IoT

De façon générale, l'Internet des Objets concerne tous les objets pouvant être connectés à un réseau Internet. Mais aujourd'hui, l'IoT concerne plus particulièrement les objets connectés équipés de capteurs, de logiciels et d'autres technologies leur permettant de transmettre et de recevoir des données entre eux, à des fins d'information ou d'automatisation. Jusqu'à présent, la connectivité venait principalement du Wi-Fi, alors qu'aujourd'hui la 5G et les autres types de plateformes en réseau offrent de traiter presque partout d'immenses ensembles de données de manière rapide et fiable.



Une fois que les appareils IoT ont collecté et transmis les données, l'objectif est d'en tirer autant d'informations que possible, et d'en extraire des résultats et insights de plus en plus précis et sophistiqués. C'est là que les technologies d'intelligence artificielle (IA) entrent en jeu : grâce à la puissance de l'analytique avancée et du Machine Learning, elles étendent les réseaux IoT.

III-3.4. Histoire de l'IoT

En 2021, on comptait plus de 10 milliards de terminaux IoT dans le monde et, d'ici 2025, IDC s'attend à ce que la génération mondiale de données dépasse 73 zettaoctets, soit 73 000 milliards de gigaoctets. Même si nous ne pouvons pas vraiment quantifier les données digitales en termes physiques, nous pouvons dire que si toutes ces données étaient stockées sur des disquettes des années 90 et qu'on les disposait les unes sur les autres, la pile pourrait aller jusqu'à la lune et revenir plus de 5 000 fois.

En à peine quelques dizaines d'années, les données IoT se sont accrues de manière exponentielle et cette croissance devrait se poursuivre. Qu'est-ce qui a déclenché cet essor de l'Internet des Objets ? Pour faire évoluer l'IoT, il fallait réunir un ensemble de technologies spécifiques et les perfectionner en même temps.

- **Connectivité** : depuis ses modestes débuts où elle utilisait des modems, la connectivité Internet et cloud est aujourd'hui suffisamment rapide et robuste pour envoyer et recevoir d'énormes volumes de données et soutenir la croissance exponentielle de l'IoT.
- **Technologie des capteurs** : face une demande d'innovation des capteurs IoT en constante hausse, le marché est passé de quelques fournisseurs de niche coûteux à un secteur de production de capteurs mondialisé proposant des prix très concurrentiels. Depuis 2004, le prix moyen des capteurs IoT a baissé de plus de 70 % et dans le même temps, la demande de fonctionnalités plus riches et d'une plus grande diversité a été satisfaite.
- **Puissance de calcul** : dans les cinq prochaines années, deux fois plus de données seront créées par rapport au début du stockage digital. Pour utiliser et exploiter toutes ces données, les entreprises modernes ont besoin de plus en plus de mémoire et de puissance de traitement. Il s'en suit une course effrénée et compétitive pour obtenir un IoT toujours plus pertinent et applicable.
- **Technologie du Big Data** : depuis les années 80, les données générées dans le monde, ainsi que la technologie informatique nécessaire pour les stocker, ont progressé de manière exponentielle. Les avancées dans le domaine des bases de données et des outils d'analyse ont permis de traiter et d'analyser en temps réel d'immenses volumes de données générées à partir de terminaux IoT, de véhicules intelligents et d'équipements. Une vitesse et une capacité essentielles pour l'Internet des Objets.

- **Intelligence artificielle et Machine Learning** : ces technologies permettent non seulement de gérer et de traiter de grandes quantités de données IoT, mais aussi de les analyser et d'en tirer des enseignements. Le Big Data est le meilleur carburant de l'intelligence artificielle et du Machine Learning. Plus les jeux de données sont volumineux et diversifiés, plus l'analytique avancée, basée sur l'IA, peut fournir des insights fiables et précis. L'essor des terminaux IoT a progressé parallèlement à l'avancée de l'intelligence artificielle et à son appétit pour les données qu'ils fournissent.
- **Cloud Computing** : tout comme la connectivité était un facteur majeur du développement de l'Internet des Objets, l'essor du Cloud Computing a aussi grandement contribué à son évolution. Capables de fournir une puissance de traitement et un stockage volumineux à la demande, les services IoT cloud ont permis aux terminaux IoT de collecter et de transmettre des ensembles de données de plus en plus volumineux et complexes.

III-3.5. Pourquoi l'IoT est-il clé pour l'industrie?

L'Internet industriel des objets (IIoT) représente aujourd'hui un levier essentiel pour les entreprises industrielles souhaitant améliorer leur performance opérationnelle. D'après une étude de Markets and Markets, l'adoption de ces technologies permettrait de réduire jusqu'à 30 % les coûts liés à la maintenance et d'augmenter l'efficacité énergétique de 20 %. Ces gains sont rendus possibles par l'exploitation des données en temps réel et par une automatisation intelligente des processus.

Dans le secteur de l'énergie, par exemple, l'utilisation de compteurs intelligents permet de surveiller les variations de consommation électrique et d'ajuster l'offre instantanément. Ce type de solution réduit considérablement les risques de surcharge et de pannes, tout en diminuant les frais d'exploitation.

De manière plus générale, l'IIoT facilite une gestion proactive des équipements, grâce à des capteurs capables d'anticiper les défaillances et de déclencher des interventions ciblées. Des industries comme l'automobile ou l'énergie en tirent déjà profit, en améliorant la gestion des ressources et en adoptant des stratégies de maintenance prédictive pour prolonger la durée de vie des installations.

III-3.6. Comment l'IoT s'inscrit-il dans l'industrie 4.0?

L'Internet Industriel des Objets (IIoT) joue un rôle crucial dans la mutation vers l'Industrie 4.0, marquant l'intégration progressive des technologies numériques dans les

processus de production. Cette évolution s'inscrit dans la continuité des révolutions industrielles précédentes : après la mécanisation, l'électrification, puis l'automatisation via l'informatique, l'Industrie 4.0 introduit l'intelligence connectée au cœur des systèmes.

L'IIoT permet de connecter les machines, les équipements et les infrastructures via des capteurs intelligents capables de collecter des données en temps réel. Ces données sont ensuite transmises à des plateformes cloud, où elles sont traitées et analysées pour produire des indicateurs précis. Cette approche permet la mise en œuvre de solutions telles que la maintenance prédictive, l'automatisation adaptive, ou encore la réduction des arrêts de production.

En s'insérant dans des systèmes cyber-physiques (CPS), l'IIoT renforce l'interaction entre les environnements physiques et numériques, facilitant la collaboration entre machines et opérateurs. Combiné à l'intelligence artificielle, au traitement de données massives (big data) ou encore à l'apprentissage automatique, il permet aux entreprises de prendre des décisions rapides, pertinentes et basées sur les données. Ainsi, l'IIoT constitue un vecteur stratégique de compétitivité, capable d'adapter l'industrie aux enjeux de réactivité, d'efficience et de personnalisation qui caractérisent l'ère numérique.

III-3.7. Comment fonctionne l'IoT ?

Là où nous ne pouvons être physiquement présents, les terminaux IoT sont nos yeux et nos oreilles. Ils capturent toutes les données pour lesquelles ils sont programmés. Ces données peuvent ensuite être collectées et analysées pour nous aider à guider et automatiser les futures décisions et mesures à prendre. Ce processus se divise en quatre étapes :

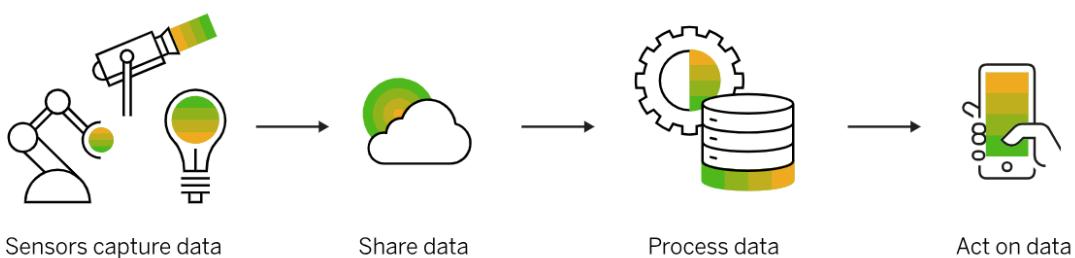


Figure 20: Les quatre étapes clés de l'Internet des Objets

- ⊕ **Capture des données.** Grâce aux capteurs, les appareils IoT capturent les données dans leurs environnements. Une tâche qui peut être aussi simple qu'un relevé de températures ou aussi complexe qu'un flux vidéo en temps réel.

- **Partage des données.** À l'aide des connexions réseau disponibles, les appareils IoT envoient ces données à un système cloud public ou privé (appareil-système-appareil) ou à un autre appareil (appareil-appareil), ou les stockent localement à des fins de traitement en périphérie.
- **Traitement des données.** À ce stade, le logiciel est programmé pour lancer une action sur la base de ces données, comme allumer un ventilateur ou envoyer un avertissement.
- **Exploitation des données.** Les données collectées de tous les appareils d'un réseau IoT sont analysées. Il en ressort de solides insights qui aident à prendre des décisions et des mesures en toute confiance.

III-3.8. Exemples d'application de l'IoT industriel

L'environnement industriel moderne intègre de plus en plus des solutions connectées intelligentes, allant de chaînes de production automatisées dans l'industrie automobile à la gestion énergétique des bâtiments, en passant par la surveillance logistique ou encore l'agriculture de précision. Ces technologies permettent d'optimiser les opérations, de réduire les coûts et d'améliorer la performance globale des systèmes [32].

a) Production industrielle

Dans le secteur manufacturier, les équipements dotés de technologies IIoT peuvent s'auto-diagnostiquer en temps réel. Grâce à des capteurs intelligents, ils analysent en continu leurs performances afin de détecter d'éventuelles anomalies et d'anticiper les pannes. Par exemple, l'entreprise Bosch utilise des dispositifs connectés pour surveiller la température de ses machines. Ces systèmes déclenchent automatiquement des opérations de maintenance préventive, évitant ainsi les arrêts imprévus et coûteux.

Les données issues des processus internes, des marchés ou des retours clients sont exploitées pour améliorer le développement de produits. En automatisant certaines phases de production, les systèmes IIoT rendent les usines plus intelligentes et plus réactives.

Chez Renault, l'intégration de capteurs IoT sur les lignes de production permet de suivre en temps réel l'état des machines et de mesurer des variables clés comme la température. En cas d'anomalie, des alertes automatiques sont générées pour prévenir les

incidents. Les données collectées servent aussi à adapter le rythme de fabrication selon les besoins, contribuant ainsi à une production plus durable et efficiente.

b) Chaîne logistique

Dans le domaine logistique, l'IoT joue un rôle central dans la gestion automatisée des stocks. Les capteurs intelligents surveillent les niveaux d'inventaire et déclenchent des commandes avant les ruptures, réduisant le gaspillage et recentrant les employés sur des tâches à plus forte valeur ajoutée.

Des entreprises comme Amazon utilisent des solutions avancées pour assurer un suivi précis des produits, des fournisseurs et des niveaux de stock. Grâce à des étiquettes RFID ou des capteurs de localisation, chaque produit peut être localisé tout au long de la chaîne logistique.

Lorsqu'une commande est enregistrée, le système identifie automatiquement les stocks disponibles et optimise les itinéraires de livraison. En cas de perturbation (problème d'approvisionnement ou de transport), il peut adapter les itinéraires ou rediriger les marchandises vers d'autres entrepôts, garantissant ainsi une continuité opérationnelle optimale.

c) Logistique intelligente

Les opérateurs logistiques adoptent des flottes de véhicules connectés pour améliorer la gestion des livraisons. Les dispositifs embarqués fournissent des données précises sur la localisation des véhicules, l'état des marchandises et les conditions de circulation. L'objectif est de maximiser l'efficacité des trajets, réduire les coûts logistiques et limiter les émissions de CO₂.

Ces technologies permettent également une gestion dynamique des itinéraires, ce qui accélère les délais de livraison, diminue les risques de retards et améliore la satisfaction client.

III-3.9. Exemples de réseaux IoT en action

Les réseaux IoT et les données qu'ils produisent interviennent dans presque tous les domaines du monde moderne : à la maison, en voiture, dans les magasins, et même dans notre corps [33].

- **Maisons intelligentes** : beaucoup de gens ont déjà l'habitude d'utiliser les réseaux IoT chez eux. Grâce à des commutateurs, des capteurs et des appareils intelligents qui

communiquent via des protocoles tels que Z-Wave ou Zigbee, les systèmes de domotique peuvent être utilisés pour surveiller et contrôler l'éclairage, la température, les systèmes de sécurité, l'électroménager, etc. Si vous avez oublié d'éteindre les lumières ou votre four en partant, vous pouvez le faire depuis votre téléphone grâce à des appareils optimisés par l'IoT.

- **Réseaux intelligents** : combinés à l'intelligence artificielle et à la technologie d'analytique avancée, les réseaux intelligents utilisent des solutions IoT pour intégrer la technologie afin d'aider les consommateurs à être plus parcimonieux dans leur utilisation de l'énergie, voire leur production d'énergie, au moyen, entre autres, de panneaux solaires. Les capteurs IoT du réseau peuvent détecter les risques potentiels plus tôt, de manière à redistribuer l'électricité selon les besoins pour prévenir ou réduire les pannes et autres problèmes. Ils peuvent également détecter les problèmes mécaniques et alerter les techniciens en cas de besoin de réparation, ce qui offre aux consommateurs un meilleur contrôle et de meilleurs insights.
- **Villes intelligentes** : d'après le Smart City Index (SCI), une ville intelligente est « un environnement urbain qui utilise la technologie pour renforcer les avantages et réduire les lacunes de l'urbanisation ». L'augmentation de la population, les embouteillages et le vieillissement des infrastructures font partie des défis que l'IoT contribue à relever. À l'aide de capteurs, de compteurs et d'autres terminaux IoT, les urbanistes surveillent et collectent les données pour résoudre les problèmes de manière proactive. Par exemple, les capteurs placés dans les égouts pluviaux peuvent détecter les niveaux d'eau et automatiser les mesures à prendre pour éviter les inondations lorsque les niveaux deviennent trop élevés.
- **Voitures connectées** : aujourd'hui, pratiquement toutes les voitures neuves sont équipées de fonctionnalités IoT et intelligentes et d'ici cinq ans, les voitures 5G devraient être de plus en plus nombreuses. Avec les systèmes avancés d'aide à la conduite qui utilisent la technologie IoT, les conducteurs peuvent éviter les collisions, planifier leurs itinéraires, se garer sur de petites places et bien plus encore. Et à mesure que l'IoT automobile se développe, on assiste aussi à une hausse de la connectivité avec des appareils externes tels que les feux de signalisation, les piétons, les sources d'information et météorologiques et les fournisseurs de services de divertissement en streaming.

- **L'IoT dans le Retail :** les solutions IoT orientées clients sont de plus en plus utilisées pour améliorer les expériences en magasin. Les caméras intelligentes à détecteur de mouvement, les rayons intelligents, la balise et les technologies RFID peuvent aider les acheteurs à localiser les articles avec une application mobile. Ces objets facilitent le partage d'informations sur le stock et même l'envoi de promotions contextuelles aux clients lorsqu'ils parcourent les allées du magasin. De plus, les expériences d'achat en magasin et en ligne étant de plus en plus similaires, les solutions IoT aident à améliorer l'expérience client en suivant les véhicules de livraison et d'expédition, ce qui permet aux clients de mieux personnaliser leurs plans d'achat.
- **Télésanté :** on recourt de plus en plus aux appareils médicaux pilotés par l'IoT, tels que des montres intelligentes et des distributeurs de médicaments qui aident les médecins à surveiller les patients à distance. Mais certaines des avancées les plus fascinantes en télésanté proviennent des outils chirurgicaux intelligents. Ces outils bénéficient surtout aux patients vivant dans des régions éloignées ou des pays sous-développés. Ils permettent aux médecins à distance de se connecter à certains des meilleurs chirurgiens du monde, d'effectuer des opérations chirurgicales guidées, des diagnostics à distance, et même de surveiller les patients anesthésiés pendant cette période critique.
- **Gestion du trafic :** grâce à un réseau de capteurs, de caméras et d'autres appareils, la technologie IoT peut servir à désencombrer le trafic et fournir d'autres options d'itinéraire réalisables. Par exemple, les flux de données en temps réel peuvent être utilisés pour envoyer des signaux au bon moment afin de fluidifier la circulation dans des conditions dynamiques. Les capteurs lumineux peuvent détecter et ajuster la luminosité de l'éclairage pour une visibilité optimale, tandis que les capteurs routiers peuvent détecter les accidents et signaler automatiquement les problèmes.

II-3.11. IoT d'entreprise vs IoT industriel (IIoT)

L'Internet des objets se divise en deux grandes applications : l'IoT d'entreprise se concentre sur la gestion opérationnelle, l'IoT industriel s'adapte spécialement aux environnements de production. L'IoT d'entreprise répond souvent à des besoins de suivi des stocks, de logistique ou d'automatisation des tâches ; l'IIoT intervient dans des contextes où la sécurité est essentielle. Les industries comme l'aérospatial, l'automobile ou l'énergie s'appuient sur l'IIoT pour surveiller des équipements en temps réel, anticiper les pannes, optimiser les performances des chaînes de production [34].

✓ Comparaison des applications et des objectifs

En entreprise, l'IoT permet de simplifier la logistique, d'optimiser les ressources. Par contre, l'IIoT se concentre sur la fiabilité des infrastructures avec le suivi en continu. La sécurité est un enjeu majeur : par exemple, dans l'industrie, un dysfonctionnement peut entraîner des arrêts coûteux avec des risques en termes de sécurité. L'IIoT apporte des solutions en matière de maintenance prédictive, de contrôle des processus en environnements critiques.

✓ Cas concrets en France

Airbus utilise des dispositifs IIoT : maintenance des avions, systèmes de surveillance des performances. Ces initiatives démontrent le rôle de l'IIoT dans la performance des infrastructures industrielles françaises.

Veolia utilise l'Internet des objets industriels dans la surveillance, l'analyse, l'optimisation de la consommation d'eau dans ses sites de traitement. L'IIoT permet d'installer des capteurs avancés dans les installations de Veolia : débit d'eau, pression, qualité, le niveau de stockage. Ces données sont ensuite transmises à une plateforme de gestion centralisée, où des algorithmes d'IA les analysent.

Cette technologie aide les opérateurs à ajuster instantanément les paramètres d'exploitation, comme l'intensité des pompes ou les cycles de filtration, en fonction des fluctuations de la demande. Par exemple, lors de pics de consommation ou en cas de détection de fuites, les dispositifs envoient aussitôt des alertes afin de limiter le gaspillage, de prévenir les incidents.

Veolia optimise la distribution et la consommation d'eau dans ses sites de traitement ; la gestion des ressources hydriques est plus durable. Ce système intelligent renforce aussi la sécurité des infrastructures, il réduit les coûts opérationnels, soutient les engagements de Veolia en matière de protection de l'environnement.

III-3.12. Avantages de l'IoT pour l'industrie

L'Internet des objets offre des avantages industriels stratégiques majeurs. Il optimise les processus, réduit les coûts de maintenance, renforce la sécurité. Les capteurs, réseaux, systèmes de gestion intelligents deviennent plus performants, les industries bénéficient d'une efficacité accrue avec moins de risques (financiers) sur site.

➤ Optimisation des processus de production

L'Internet industriel des objets améliore l'efficacité des processus de production via l'analyse des données en temps réel. Les capteurs intelligents installés sur les équipements industriels mesurent plusieurs paramètres comme la température, la vitesse de fonctionnement ou les vibrations des machines. Ces informations sont ensuite utilisées pour ajuster automatiquement les opérations, prévenir les interruptions et réduire le gaspillage de ressources.

En France, Air Liquide utilise des capteurs IIoT pour surveiller la production de gaz industriels. Ces dispositifs suivent les flux de gaz et la consommation énergétique en temps réel. Grâce à cette technologie, l'entreprise ajuste ses processus automatiquement, ce qui permet d'optimiser l'efficacité énergétique et de réduire les pertes.

De même, PSA Peugeot Citroën a déployé des systèmes IIoT dans ses usines pour assurer une surveillance continue des équipements critiques. Les capteurs mesurent en permanence des variables telles que les vibrations des machines. Si une anomalie est détectée, les systèmes ajustent aussitôt la cadence de production pour éviter les arrêts coûteux.

➤ Maintenance prédictive et réduction des coûts

La maintenance prédictive, rendue possible par les technologies IoT, est un atout essentiel pour les entreprises industrielles. Elle repose sur l'analyse en temps réel des données recueillies par des capteurs connectés ; elle détecte des signes avant-coureurs de pannes mécaniques. Cela permet d'anticiper une défaillance, de planifier les réparations de manière proactive, de réduire les coûts liés aux interruptions imprévues.

En France, la SNCF utilise des capteurs intelligents sur ses trains pour surveiller en continu l'état des freins, des moteurs, des systèmes de sécurité. Grâce à l'analyse prédictive, les équipes de maintenance sont alertées pour assurer la sécurité des passagers.

Michelin : optimisation des processus de production grâce à l'IoT

L'entreprise de pneumatiques Michelin utilise des capteurs IoT sur ses lignes de production pour surveiller les conditions en temps réel, la température, l'humidité, la pression, etc. En cas d'anomalie détectée, les systèmes ajustent automatiquement les paramètres ou envoient une alerte à l'équipe de maintenance. Cette stratégie a permis de réduire les temps d'arrêt, d'améliorer la qualité des produits, de réduire la consommation d'énergie, pour une production plus durable.

➤ Sécurité renforcée sur les sites industriels

Dans des secteurs sensibles comme l'énergie ou la chimie, la sécurité est renforcée grâce aux technologies IoT. Total Énergies utilise des systèmes intelligents sur ses sites pour détecter les fuites de gaz. Des alertes automatiques assurent la protection des employés et de l'environnement.

Dans l'industrie nucléaire, EDF a investi dans des technologies de cybersécurité avancées pour protéger ses infrastructures critiques. Elle utilise l'analyse des menaces en temps réel pour sécuriser les installations contre les cyberattaques potentielles.

➤ Une gestion des stocks optimisée plus intelligente

La gestion des stocks devient plus précise grâce aux capteurs IIoT de surveillance de l'état des inventaires, la température des entrepôts, les conditions environnementales critiques. Cela est utile en particulier pour les biens périssables ou sensibles, comme les produits pharmaceutiques ou alimentaires. Carrefour a adopté des solutions IoT pour gérer la chaîne du froid de ses entrepôts : les dispositifs alertent automatiquement les équipes en cas de variations de température. La qualité des produits est garantie.

Les systèmes IIoT anticipent également les ruptures de stock, ils automatisent les commandes d'approvisionnement. Cela permet de simplifier la logistique. Amazon France utilise des systèmes intelligents et des réseaux de gestion connectés pour garantir une distribution fluide, même en période de forte demande. Les itinéraires de livraison sont planifiés avec une réactivité accrue face aux fluctuations du marché.

Les entreprises françaises bénéficient d'une gestion des stocks plus intelligente, respectueuse des délais et des normes de qualité.

III-3.13. Quelles sont les technologies IoT industrielles?

Les technologies IoT industrielles transforment les environnements de production grâce à des outils connectés au service des opérations, de la sécurité, de la réduction des coûts. Elles reposent sur des infrastructures de connectivité avancées, comme la 5G ; la communication est fiable. Les capteurs IIoT collectent des données en temps réel, analysées ensuite via des systèmes de cloud computing ou directement à la source grâce au edge computing pour des réponses instantanées. L'intelligence artificielle combinée au machine learning offre des capacités prédictives. Des technologies comme la blockchain garantissent davantage la transparence des échanges.

Connectivité (et 5G)

Les réseaux de connectivité robustes, comme la 5G, sont indispensables pour les opérations industrielles modernes. Dans le secteur minier, les machines automatisées, comme les foreuses, dépendent de la 5G pour communiquer instantanément avec le centre de contrôle, même dans des conditions souterraines difficiles. La coordination est plus précise, les risques d'accidents moins nombreux, l'extraction reste très efficace.

Capteurs IIoT

Ces systèmes intelligents sont utilisés dans des environnements sensibles comme les centrales de traitement de l'eau. Des capteurs de pression/qualité de l'eau ajustent automatiquement les opérations pour maintenir des niveaux de sécurité. En cas de détection d'une contamination, le système peut activer des protocoles de sécurité, les gestionnaires sont prévenus pour éviter toute menace sanitaire.

Puissance de calcul dans le cloud et calcul de pointe

Dans l'agro-industrie, le cloud computing est utilisé pour analyser des milliers de points de données collectés par des capteurs environnementaux. Les fermes connectées s'appuient sur des calculs en temps réel via le edge computing pour ajuster les systèmes d'irrigation et de fertilisation en fonction des conditions météorologiques changeantes. L'agriculture de précision maximise les rendements, minimise le gaspillage de ressources.

IA et machine learning

Les solutions basées sur l'intelligence artificielle permettent des optimisations étonnantes dans l'industrie chimique. Des algorithmes d'IA analysent les données des réacteurs chimiques pour ajuster la température/pression en temps réel, garantir une production stable de qualité. Les rejets de produits défectueux sont moins nombreux, l'empreinte environnementale de l'usine diminue.

III-3.14. Sécurité pour les systèmes cyberphysiques

Dans les infrastructures critiques comme les réseaux de distribution d'électricité, les dispositifs IIoT sont protégés par une cybersécurité avancée. Des systèmes d'analyse des menaces en temps réel peuvent détecter des anomalies dans les flux de données, signaler des cyberattaques potentielles. Une menace est détectée : les mesures de sécurité s'activent pour isoler la zone touchée.

III-3.14.1. Device de journalisation électronique (ELD)

Des dispositifs de journalisation électronique surveillent l'utilisation des véhicules dans les secteurs de la logistique et du transport. Une flotte de camions de livraison est équipée de capteurs qui suivent le comportement des conducteurs. Les données sont utilisées pour optimiser les itinéraires, ajuster les plannings de conduite pour respecter les réglementations sur le temps de repos, améliorer la sécurité sur la route.

III-3.14.2. Intelligent Edge

Dans le domaine des opérations portuaires, l'Intelligent Edge joue un rôle crucial. Les grues connectées utilisent des systèmes intelligents pour mesurer le poids des conteneurs. Elles synchronisent les opérations de chargement/déchargement en temps réel. Le traitement rapide des données à la périphérie (Edge) permet d'éviter des retards coûteux, de garantir une gestion fluide des cargaisons, même lorsque la connectivité avec le cloud est instable.

III-3.14.3. Maintenance prédictive

Les systèmes de maintenance prédictive sont essentiels au sein de l'industrie des transports ferroviaires. Les trains sont équipés de capteurs pour surveiller l'état des freins, des moteurs, des roues, etc. Lorsqu'une défaillance potentielle est détectée, une alerte est envoyée, les équipes de maintenance planifient des réparations avant la survenance du problème.

III-3.14.4. Identification par fréquence radio (RFID)

La technologie RFID est déployée pour suivre les produits dans les entrepôts automatisés (cf. distribution). Les vêtements dans un centre de distribution sont équipés de balises RFID. Cela permet de localiser instantanément un article, de suivre son parcours à travers l'entrepôt, de réduire le temps de préparation des commandes. Cette approche diminue les erreurs d'expédition, toujours pour augmenter la satisfaction des clients.

III-3.15. Tendances et perspectives de l'IoT en 2025

L'année 2025 s'annonce décisive dans l'Internet des objets industriels, avec des avancées technologiques à l'impact économico-environnemental. L'IoT conduit vers une production toujours plus agile.

III-3.15.1 Vers une écoresponsabilité renforcée avec l'IoT

Face aux défis climatiques, l'IoT devient un levier stratégique de réduction de l'empreinte carbone. Les capteurs intelligents permettent aux entreprises de surveiller la consommation de leurs équipements, ils réduisent l'impact environnemental.

STMicroelectronics s'appuie sur l'IIoT dans le but d'optimiser l'efficacité énergétique de ses chaînes de production, il analyse les niveaux de consommation d'énergie, il réduit le gaspillage. Ces avancées participent directement aux engagements de décarbonation des industries, comme le prévoit le Plan France Relance.

➤ **Le Plan France Relance : un soutien clé pour l'Industrie**

Le Plan France Relance, lancé par le gouvernement français en 2020, est une initiative ambitieuse de 100 milliards d'euros. Elle revitalise l'économie, soutient la transition numérico-écologique des entreprises. Une part significative de ce plan est consacrée à l'industrie, avec des investissements ciblés (modernisation des processus de production, promotion de l'innovation technologique).

Le plan offre des subventions et dispositifs de financement aux PME/ETI. Les entreprises peuvent installer des capteurs connectés, automatiser leurs chaînes de production, ou optimiser leur consommation d'énergie.

Le Plan France Relance inclut des programmes de formation d'accompagnement à la montée en compétences des salariés. Ce plan vise à créer un écosystème industriel plus résilient, à même de répondre aux défis de demain en stimulant la croissance économique.

III-3.15.2. Impact des réseaux 5G et de l'Edge Computing sur l'IIoT

L'extension de la 5G, du edge computing transforme l'IIoT. La 5G, avec sa bande passante élevée, permet une communication rapide entre les appareils connectés, crucial avec les véhicules autonomes ou la maintenance prédictive. Le edge computing rapproche le traitement des données des capteurs eux-mêmes, il offre des réponses quasi-instantanées avec une sécurité accrue concernant les opérations en environnements sensibles.

III-3.15.3. La blockchain et l'intelligence artificielle : innovations 2025

Le combo blockchain/intelligence artificielle continuera à proposer des innovations majeures en 2025, permettant une meilleure gestion des données industrielles. La blockchain garantit la traçabilité des échanges grâce à des interactions sécurisées, la transparence dans les chaînes logistiques. L'IA accélère l'analyse des données recueillies par les capteurs, elle permet aux systèmes de prévoir les pannes.

III-3.16. L'avenir de l'IoT

L'évolution de l'Internet des objets s'oriente vers une intégration toujours plus harmonieuse entre les technologies numériques et l'expérience humaine. Si le métavers reste

en phase de maturation, les progrès en matière de réalité virtuelle immersive, d'audio spatial, de technologies haptiques (retours sensoriels) et de personnalisation en temps réel grâce à l'intelligence artificielle annoncent une transformation profonde de nos interactions avec l'environnement numérique.

Ces avancées promettent des expériences sensorielles de plus en plus immersives et naturelles, redéfinissant notre rapport aux objets connectés du quotidien. Par ailleurs, le développement accéléré de la 5G et de la connectivité à haut débit, désormais accessible à l'échelle mondiale, ouvre la voie à un partage d'expériences sans contrainte géographique.

Ces innovations auront des retombées majeures sur des secteurs clés le monde du travail, la médecine (notamment la chirurgie à distance et la télésanté), l'immobilier, le commerce, les transports ou encore les interactions sociales. L'IoT du futur ne se contentera plus de connecter des objets : il participera activement à la reconfiguration des usages, des services et des modèles sociaux, en plaçant l'humain au centre d'un écosystème numérique intelligent et sensible [35].

Conclusion

Les technologies telles que le Big Data, l'impression 3D et l'Internet des Objets constituent les piliers de l'industrie 4.0. Elles permettent une personnalisation accrue des produits, une meilleure exploitation des données et une connectivité en temps réel entre les systèmes. L'adoption de ces innovations, bien qu'elle nécessite des investissements, représente un levier essentiel pour la compétitivité industrielle. Une gestion efficiente des données et une stratégie technologique intégrée sont indispensables pour tirer pleinement profit de ces outils.

Chapitre 4 : Proposition d'un programme d'usinage des couronnes dentées à CNC

Introduction

On peut commencer à parler de commande numérique appliquée à l'industrie au début du 19ème siècle dans la ville de Lyon, Joseph-Marie Jacquard invente un métier à tisser automatique en utilisant des bandes perforées qui contrôlent le tissage de motifs compliqués. Dans les années 1880, le statisticien américain Hermann Hollerith à l'idée d'utiliser des cartes perforées, similaires à celles de Jacquard, pour traiter des données. Les premières applications de la commande numérique pour l'usinage trouvent leurs origines dans l'industrie aéronautique et se sont développées en trois étapes :

- Le point par point
- Le paraxial
- Le contournage par interpolation

IV-1. Structure d'un programme

Un programme est une série d'informations qu'on introduit dans la partie commande pour être interprétée par la partie opérative. Le programme se compose de trois parties essentielles :

- La partie du début de programme qui est généralement composée de deux ou trois premières séquences dans lesquelles on trouve toutes les informations concernant les décalages, les instructions de mise en marche de la broche et de la pompe d'arrosage, numéros d'outils utilisés, vitesse d'avance, sens de rotation de la broche, unité de mesure utilisée.....
- La deuxième partie du programme est la plus importante et elle contient toutes les informations concernant l'usinage.
- La dernière partie qui est composée de deux ou trois séquences et dont laquelle on trouve toutes les informations concernant l'annulation des différents décalages, l'arrêt de la broche, l'arrêt de la pompe d'arrosage, fin du programme.

IV-2. Les différents types de MOCN

Les centres d'usinage sont des machines-outils qui travaillent par enlèvement de matière et permettent de réaliser automatiquement des opérations de fraisage, alésage, perçage,

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

taraudage. Elles possèdent un magasin d'outils avec changeur automatique et peuvent être équipées d'un dispositif automatique de chargement des pièces. [36] L'ensemble de ces fonctions est géré par un ou plusieurs systèmes électroniques programmables (commande numérique (CN), ordinateur, automate programmable...). On distingue plusieurs types de machines :

- Les machines à enlèvement de copeaux : les perceuses, les tours 2 et 4 axes, les centres de tournages 5 axes, les fraiseuses 2 axes 1/2, 3 axes, les centres d'usinage, 3 à 5 axes, les rectifieuses, les affûteuses, les machines d'usinage à très grande vitesse...
- Les électroérosions : les machines à enfonçages, les machines à fil.
- Les machines de découpes : oxycoupage, laser, jet d'eau...
- Les presses : métal, injection plastique.
- Les machines à bois : à portique ou col de cygne.
- Les machines spéciales : à panneaux, à têtes multiples, de conditionnement (Pour l'agroalimentaire) ...

IV-3. Classification des MOCN [36]

Les machines-outils à commande numériques sont classées selon :

- La nature de déplacement ;
- Le nombre d'axes de la machine ;

IV-3.1. Classification selon la nature de déplacement

On distingue trois types :

- Machine à déplacement par positionnement "point à point" ;
- Machine à déplacement "par axial" ;
- Machine à déplacement "continu" ;

1. Déplacement par positionnement "point à point"

Le passage d'un point à un autre s'effectue en programmant la position finale et le trajet parcouru pour atteindre cette position n'est pas contrôlé par le directeur de commande numérique. Par exemple, les trajectoires planes d'un point A vers un point B peuvent s'exécuter

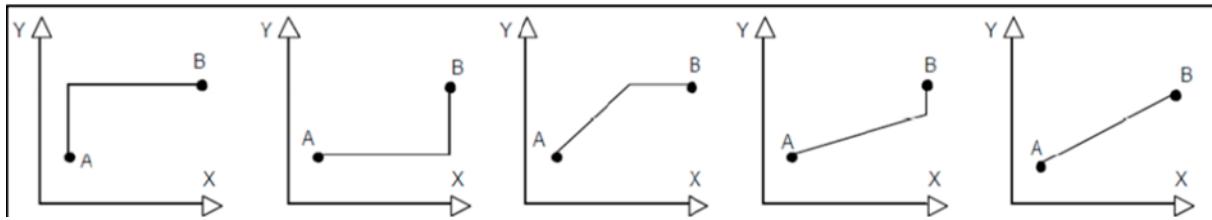


Figure 21: Trajectoires en positionnement point à point

de manières différentes schématisées fig..

2. Déplacement par axial

Les trajectoires sont parallèles aux axes de déplacement et la vitesse de déplacement (programmable) est contrôlée. Ce type de déplacement permet par exemple des fraisages précis à vitesses imposées.

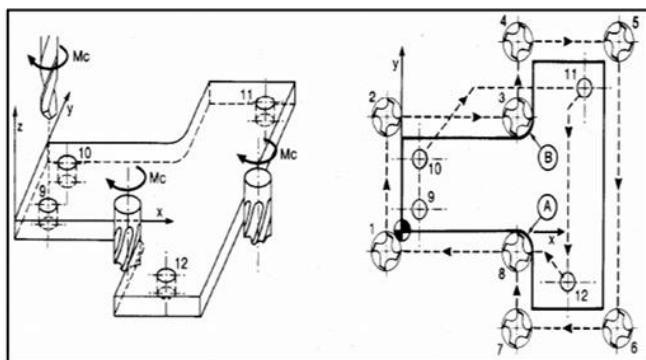


Figure 22: Fraisage paraxiale.

3. Déplacement continu

Ce type de machine permet l'usinage des pièces de formes (les filetages, les ailettes de turbine, pièces tridimensionnelles complexes...etc. Les déplacements sont contrôlés sur des trajectoires quelconques. Ce mode de fonctionnement permet de réaliser des travaux de



Figure 23: Contournage CNC

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

contournage (voir **figIV-3**). Travail de contournage Pour la définition des trajectoires, les commandes numériques de ce type font appel aux interpolations linéaire et circulaire. L'interpolation permet de contrôler instantanément l'outil durant l'usinage. La commande numérique de contournage est la plus utilisée, elle est nécessaire sur les tours pour l'usinage des cônes, des arrondies, sur les fraiseuses pour la réalisation des formes compliquées (matrices d'estampage, outil d'emboutissage, ailettes...).

IV-3.2. Classification selon le nombre d'axes

La classification des machines-outils à commande numérique selon le nombre d'axes et le type de machine, est présentée sur le tableau ci-dessous :

Tableau 3: Classification suivant le nombre d'axe.

Nombre d'axes	Mouvements	Machines et types d'usinage	
1	Z	Brochage, presse	
2	X, Z	Machine de tournage	Tournage, les formes réalisées possèdent le même axe de symétrie.
3	X, Z, C		Tournage avec asservissement de la broche en position.
4	2x (X, Z)		Tournage à deux tourelles.
5	2x (X, Z), C		Tournage à deux tourelles et asservissement de la broche.
3	X, Y, Z	Machine de fraisage	Fraisage : surfacage, fraisage de poches, perçage, fraisage de rainure, de surfaces gauches.
4	X, Y, Z, B		Fraisage : surfacage, fraisage de poches, perçage, fraisage

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

		de rainure, de surfaces gauches.
4	X, Y, Z, C	Fraisage surfaçage, fraisage de poches, perçage, fraisage de rainure, de surfaces gauches.
5	X, Y, Z, B, C	Fraisage des formes gauches, perçage dans toutes directions.
5	X, Y, Z, A, C	Fraisage de formes gauches, usinage privilégié des pièces de dimensions importantes.
5	X, Y, Z, A, B	Fraisage de formes gauches.
5	X, Y, Z, B, W	Fraisage de formes complexes.

Chaque mouvement de translation ou de rotation est donc représenté par un axe défini une lettre affectée de signe + ou -. La figure IV-4 montre l'ensemble des axes qu'un DCN peut contrôler [36].

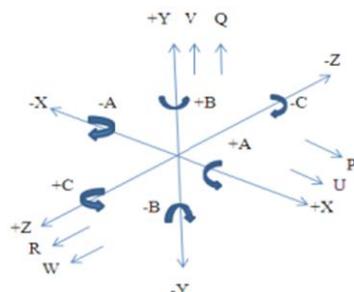


Figure 24: Axes primaires et axes additionnels.

IV-4. Les types des MO à tailler les couronnes dentées à CNC

IV-4.1. Définition

La programmation CNC (Commande Numérique par Ordinateur) désigne l'ensemble du processus permettant de traduire une conception numérique — généralement issue d'un modèle 3D — en un langage compréhensible par une machine-outil automatisée. Cette séquence d'instructions est ensuite transférée au contrôleur CNC, qui pilote avec précision l'exécution des opérations d'usinage en suivant la trajectoire et les paramètres spécifiés.

Essentielle dans la fabrication moderne, la programmation CNC a progressivement remplacé les procédés d'usinage manuels. Les machines CNC, automatisées et précises, permettent une meilleure qualité de production, une réduction des erreurs humaines et une productivité accrue.

La programmation peut se faire de deux manières : directement sur l'interface de la machine (programmation manuelle), ou à l'aide de logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur). Ces derniers simplifient considérablement la création de parcours d'outils, en particulier pour des pièces complexes, en automatisant l'enchaînement des opérations nécessaires à leur fabrication.

IV-4.2. Qu'est-ce que la programmation CNC?

La programmation CNC fait référence à la conversion d'un modèle CAO 3D (conception assistée par ordinateur) en un ensemble d'instructions lisibles par machine qui comprennent : les outils de coupe à utiliser, la vitesse d'avance et l'endroit où déplacer l'outil pour créer la pièce finale. La programmation CNC est le processus de création d'instructions pour les outils de coupe. Les programmeurs CNC utilisent un logiciel de FAO pour créer des programmes CNC ou ils peuvent saisir manuellement le code CNC pour des pièces simples. Vous trouverez ci-dessous une console de programmation d'usinage CNC typique :

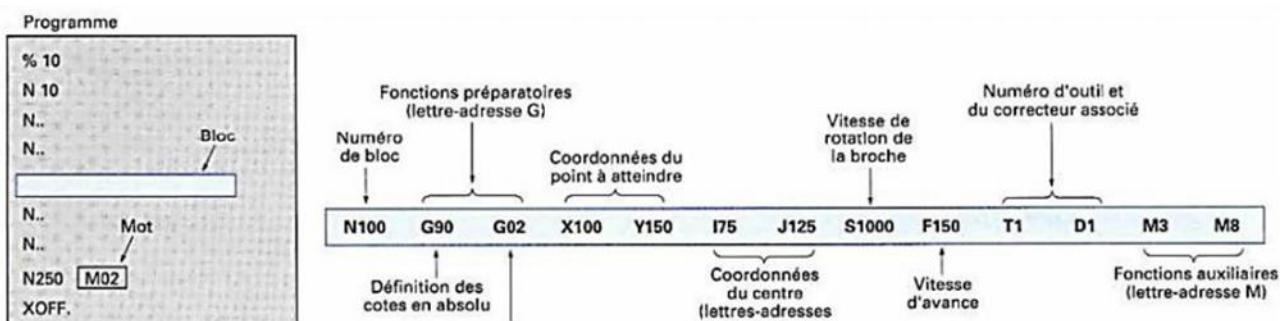


Figure 25: Structure d'un programme.

IV-4.3. Les codes et fonctions

- Fonctions préparatoires (G), fonctions d'appel de mode d'interpolation, cycles machine ;
- Coordonnées de points (X, Y, Z, I, J, K) ;
- Vitesses, avances... (S, F) ;
- Fonctions auxiliaires (M) qui permettent d'enclencher la lubrification, de changer d'outil, ou de déclencher des accessoires ;

Adresses et définitions

Tableau 4: Adresses utilisées.

Fonctions	Désignations	Significations
Début du programme	% , O	Paramètre d'entrée
Ordre	N	Numéro de bloc
	H	Numéro de sous-programme
Fonctions préparatoires	G	Préparent la machine pour ordre précis
Déplacement suivant les axes	X Y Z A B C	Valeurs de déplacement positif ou négatif suivant les axes
Avance	F	Vitesse d'avance Vf exprimée en mm/tr(G95) ou en mm/min(G94)
Vitesse	S	N (tr/min) ou Vc(m/min) suivant G96 ou G97 placé avant
Fonctions auxiliaires	M	Fonctions particulières désignant un ordre
Outils	T...D...	Sélection de l'outil et de son correcteur
Rayon	R	Rayon de cercle en G02, G03
Plan de sécurité	ER	Plan de référence de cycle

 **Les fonctions préparatoires G**

Tableau 5: fonctions préparatoires.

Commande	Description
G00	Avance rapide en coordonnées cartésiennes
G01	Interpolation linéaire
G02	Interpolation circulaire dans le sens horaire
G03	Interpolation circulaire dans le sens anti-horaire
G04	Temporisation
G10/G11	Ecriture de données/effacement de données
G17	Sélection du plan X-Y
G18	Sélection du plan X-Z
G19	Sélection du plan Y-Z
G20	Programmation en pouces
G21	Programmation en mm
G33	Filetage à pas constant
G34	Filetage à pas variable
G40	Pas de compensation de rayon d'outil
G41	Compensation de rayon d'outil à gauche
G42	Compensation de rayon d'outil à droite
G53	Suppression du décalage d'origine
G54	Décalage d'origine
G90	Programmation en cote absolue
G91	Programmation en cote relative

 **Fonctions auxiliaires**

Tableau 6: Fonctions auxiliaires

M00	Arrêt programmé
M01	Arrêt optionnel programmé
M02	Fin de programme pièce
M03	Rotation de la broche sens horaire
M04	Rotation de la broche sens anti-horaire
M05	Arrêt de la broche
M06	Changement d'outil automatique ou manuel
M07	Mise en route de l'arrosage par le centre de la broche
M08	Mise en route de l'arrosage externe
M09	Arrêt l'arrosage
M30	Fin de programme
M99	Fin de sous-programme

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

➤ Exemple de programme de fraisage CNC

%	Nom de programme
N05	G54 G90 G42
N10	G96 S200 F0.5 M03
N15	T2 D2 M03
N20	G00 X5 Y5 Z5
N25	G01 X5 Y5 Z-3
N30	Y35
N35	X15 Y45
N40	X25
N45	Y35
N50	X55
N55	Y45
N60	X65
N65	G02 X75 Y35 CR=10
N70	G01 Y15
N75	X55
N80	X35 Y5
N85	X5 Y5
N90	G00 Z10
N95	M30

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

➤ Exemple de programme tournage CNC

%	Le nom du programme
N10	G54 G90
N20	G96 S150 F0.5 M03
N30	T1 D2 M03
N40	G00 X42 Z-0.5
N50	G01 X14 Z0
N60	X10 Z-3
N70	X20 Z-5
N80	G03 X20 Z-25 CR=20
N90	G01 X20 Z-30
N100	G02 X30 Z-35 CR=5
N110	G02 X40 Z-40 CR=5
N120	G01 X40 Z-55
N130	G00 X50 Z10
N140	M30

La plupart des machines actuelles acceptent des blocs à format variable dans lesquels ne figurent que les seules instructions nécessaires à leur exécution. Celles déjà fournies et encore actives n'ont pas à être répétées. Chaque fabricant de CN spécifie, dans son manuel de programmation, la façon d'écrire les données numériques allouées aux différentes lettres adresses (nombre de chiffres avant et après la virgule, mode de séparation des entiers et des décimales, etc.). A titre d'exemple, les lettres-adresses usuelles retenues par NUM sont indiquées sur le tableau IV-5.

Un programme commence toujours par le signe "%", suivi du N° du programme et éventuellement un commentaire entre parenthèses de 40 caractères maximum. Exemple : %

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

250 (Carter en AU5GT Réf.79-80100) Le numéro de bloc (adresse N suivie d'un nombre de 1 à 5 chiffres) figure obligatoirement au début de chaque bloc. Les blocs sont numérotés dans un ordre croissant de 5 en 5 ou de 10 en 10 permettant ainsi l'insertion des lignes en cas d'erreur.

Les fonctions préparatoires (adresse G suivie d'un nombre de 1 à 2 chiffres – tableau IV-6) définissent le déroulement de certaines fonctions de commande et préparent la CN à exécuter une action bien précise. Ce sont généralement des ordres de déplacement, de décalage, d'appels de cycles spécifiques d'usinage, etc. Ces fonctions peuvent être modales, c'est-à-dire automaintenues tant qu'elles ne sont pas révoquées par une fonction contradictoire, ou non modale lorsqu'elles ne sont actives que dans le bloc où elles sont programmées. Un bloc d'information peut contenir plusieurs fonctions préparatoires si elles ne sont pas contradictoires.

Les ordres de déplacement, composés d'une adresse accompagnée de sa valeur formatée, sont les suivants :

- X, Y, Z pour les mouvements principaux,
- U, V, W pour les mouvements secondaires,
- I, J, K pour les paramètres d'interpolation,
- A, B, C pour les coordonnées angulaires ;

Les mots correspondant aux fonctions diverses sont appelés par leurs adresses :

- S pour la vitesse de rotation de la broche,
- F pour la vitesse d'avance demandée aux organes mobiles,
- T pour le numéro d'outil,
- D pour le numéro du correcteur d'outil,
- R pour la programmation d'un cercle par son rayon en interpolation circulaire.

Les fonctions auxiliaires (adresse M suivie d'un nombre de 1 à 3 chiffres – tableau IV-7) servent essentiellement à la programmation des fonctions de commutation de la machine.

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

Tableau 7: Les lettres-adresses usuelles retenues

ADRESSE ET FORMAT [...]	DESIGNATION
% [04]	Début du programme avec précision de son numéro
N [05]	Numéro de séquences (0 à 32767)
G [02]	Fonctions préparatoires
H [04]	N° de sous-programme d'usinage dans la séquence d'appel comportant G77
X [± 053]	Déplacement en X : premier axe principal. Programmé au diamètre ou au rayon en tournage
Y [± 053]	Déplacement en Y : Deuxième axe principal en fraisage
Z [+053]	Déplacement en Z : coïncide avec l'axe de l'élément tournant
I [± 053]	En G2 ou G3, coordonnées absolues ou relatives du centre du cercle
J [± 053]	En G33 ou G38, K pas du filet projeté sur X ou Z suivant l'angle de cône
K [± 053]	En G64 ou G65, surépaisseur d'ébauche suivant X ou Z
C [033]	Axe broche indexé modulo 360°
P [053]	En G33, profondeur totale du filet En G64 ou G65, pénétration à chaque passe suivant X En G66, valeur du pas suivant X En G83 ou G87, valeur de la première pénétration

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

F [052]	En G94, vitesse d'avance exprimée en mm/mn. Max. 15 m/mn En G95, F023 : vitesse d'avance en mm/tr. Max. 16 mm/tr En G33, F01 : nombre de filets En G04, F022 : valeur de la temporisation. Max. 99.99s.
M [03]	Fonctions auxiliaires : 32 décodées, 224 codées
S [05]	En G97, vitesse de rotation de broche en tr/mn En G96, vitesse de coupe en m/mn En G92, vitesse de broche maximum en tr/mn En G33, nombre de passes En G77, nombre de répétitions d'un sous-programme
T [05]	Numéro d'outil de 0 à 65000
D [02]	Numéro de correcteur de 0 à 99
L [03]	Variables programmes de 0 à 19 et de 100 à 199

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

Tableau 8: Fonctions préparatoires (G).

G00	Avance rapide
G01	Interpolation droit
G53	Point zéro machine
G54 G55 G56 G57	Point zéro
G58	
Cycle de taillage denture intérieure	
G70	Arrêter le cycle
G71	Génération en avant
G72	Génération en arrière
G73	Positionnement en développante
G75	Avance radiale avec développante avec avance radiale constante
G76	Avance radiale avec développante avec avance radiale dégressive
G77	Procédé de division individuelle avec avance radiale constante
G78	Procédé de division individuelle avec avance radiale dégressive
Cycle de taillage denture extérieure	
G80	Arrêter le cycle
G81	Génération en avant
G82	Génération en arrière
G83	Positionnement en développante
G85	Avance radiale avec développante avec avance radiale constante
G86	Avance radiale avec développante avec avance radiale dégressive

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

G87	Procédé de division individuelle avec avance radiale constante
G88	Procédé de division individuelle avec avance radiale dégressive
G90	Programmation en cote absolue
G91	Programmation en cote relative

Tableau 9: Fonctions auxiliaires (M).

M06	Changement d'outil
M07	Arrosage 1
M08	Arrosage 2
M09	Arrêt arrosage
M12	Arrêt entraînement cours et arrosage
M13	Entraînement course à droit et arrosage marche
M41	Vitesse I entraînement course
M42	Vitesse II entraînement course
M43	Vitesse III entraînement course
M44	Serrage axe X marche
M45	Arrêt serrage axe X
M58	Arrêt de course en haut
M59	Arrêt de course en bas
M88	Denture intérieure
M89	Denture extérieure
M93	Décalage de la course descente
M94	Décalage de la course montée
M99	Arrêt après fin usinage

IV-5. Proposition d'un programme d'usinage des couronnes dentées à CNC au niveau Les AMM

Les Ateliers Maghrébins de Mécanique (A.M.M), filiale de SIDER créés en 1993, sont spécialisés dans la **production, réparation et rénovation** de pièces mécaniques destinées aux industries sidérurgiques, mécaniques et pétrochimiques. Implantés sur 36 hectares au sein du complexe d'IMITAL SIDER, ils disposent d'ateliers d'usinage, forge, caoutchoutage et stockage. Grâce à leurs **capacités techniques et humaines élevées**, les A.M.M répondent aux besoins du marché local et à l'export, contribuant à la **maintenance industrielle** et à la **réduction de la dépendance aux importations**.

IV-5.1. Définition de la pièce choisie

La couronne dentée est une pièce circulaire avec des dents réparties uniformément sur sa périphérie. Elle est conçue pour transmettre un mouvement rotatif dans un mécanisme d'engrenage. Cette pièce est réalisée en acier faiblement allié (42CD4), ce qui lui confère une bonne résistance mécanique et une durabilité accrue.

IV-4.2. Quelques informations sur la composition chimique de le matériau à usiner:

Tableau 10: Propriétés chimiques de matériau.

Nuance	Type d'acier	% carbone	% Chrome	% Molybdène
42CrMo04	Faiblement allié	0.42	1.00	0.20 Des traces de molybdène

Tableau 11: Propriétés mécaniques de matériau.

Nuance	Densité Kg /m ³	Forgeage C°	Trempe C°	Recuite C°	Dureté HB
42CrMo04	7.8	900/1100	840	825	217

IV-5.3. Calcul du régime de coupe

Calcul de nombre de tour N :

D'après les tableaux des régimes de coupe on à la 1ere passe et la 2eme passe

➤ La 1ere passe : **Vc=20 m/min**

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} = \frac{1000 \times 20}{3,14 \times 850} = 7,493 \text{ tr/min}$$

➤ La 2eme passe : **Vc=40m/min**

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} = \frac{1000 \times 40}{3,14 \times 850} = 14,986 \text{ tr/min}$$

Calcul de la vitesse de coupe :

$$V_C = \frac{\pi \times D \times N}{1000} = \frac{3,14 \times 850 \times 7,493}{1000} \approx 20 \text{ m/min}$$

$$V_C = \frac{\pi \times D \times N}{1000} = \frac{3,14 \times 850 \times 14,986}{1000} \approx 40 \text{ m/min}$$

Tableau 12: Tableau des vitesses de coupe et des avances pour le dressage

Matière à usiner	Outil de coupe en acier rapide		Outil de coupe avec plaquette en métal dur brasé	
	Ebauche	Finition	Ebauche 1,2	Finition 0,2
		Vitesse de coupe en m/min		
Acier < 60 daN/mm ²	20	40	100-160	200-350
Acier < 60daN/ mm ²	15	25	70-120	160-300
Acier inoxydable	15	25	70-150	150-250
Fonte	15	25	50-100	100-250
Bronze-Laiton	25	50	200-250	300-400
Alliage d'aluminium	100	200	400-800	700-1500
Matières synthétiques (caoutchouc-plastique)	25	50	100-200	200-400

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

Tableau 13: Les caractéristiques de la pièce

MODULE NORMAL/AXIAL	10
NOMBRE DE DENTS	83
ANGLE D'HELICE	—
DIAMETRE EXTERIEUR	850
LARGEUR DE DENTURE	0
COEF, DE DEPORT	0
DIAMETRE PRIMITIF	830
HAUTEUR DE MONTAGE	301
ANGLE DE PRESSION	20

Calcul profondeur totale de taillage :

$$h = m \times 2,25 = 10 \times 2,25 = 22,5 \text{m}$$

$$h = 22,5 \text{m}$$

Calcul nombre des passes :

$$m \times \pi = 10 \times 3,14 = 31,4 \text{ pas}$$

Calcul diamètre extérieur :

$$D_p + 2m = 830 + 2 \times 10 = 850$$

$$D_p = 850 \text{mm}$$

Calcul l'épaisseur :

$$S = \frac{\pi \times m}{2} = S = \frac{3,14 \times 10}{2} = 15,7$$

$$S = 15,7 \text{mm}$$

IV-5.4. Le mode d'obtention de l'ébauche dans l'entreprise AMM

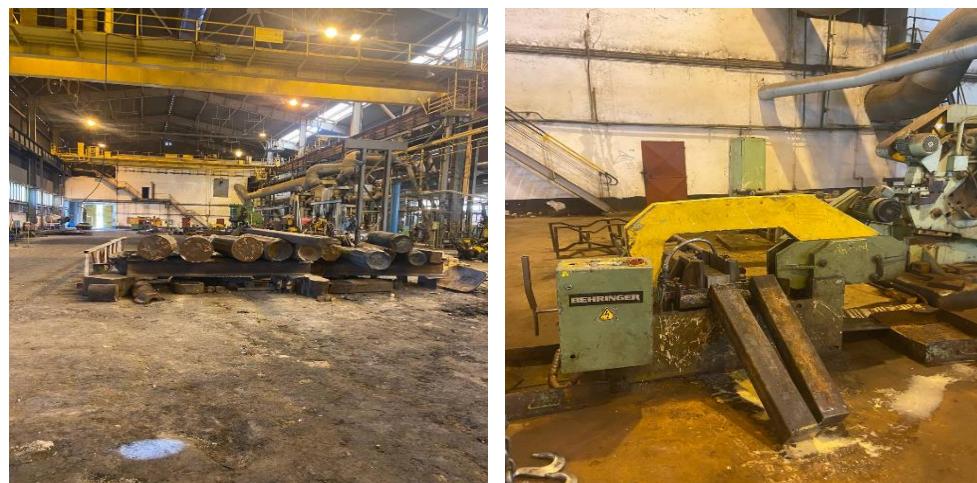


Figure 26 : Echantillon de forge.



Figure 27: Le four à gaz.

IV-5.5. Donnés de départ de l'entreprise

IV-5.5.1. Condition de coupe en taillage

Tableau 14: Condition de coupe de taillage extérieure.

Condition	Ebauche	Finition
Vitesse de coupe (m/min)	20	40
Avance (mm/tour)	5	0.6

IV-5.5.2. Les programmes CNC

IV-5.5.2.1. Programme de taillage

***Données de fraise :**

- Module normal : 10mm.
 - Nombre de filets : 1.
 - Angle de pression : 20° .
 - Angle d'inclinaison : 6.13° .
 - Nombre de goujure : 9.
 - Longueur de goujure : 143mm.
 - Diamètre réel : 139.848mm.
 - Diamètre diagonale : 132.800.
 - Profile de référence : 0
 - Pas axial : 31.415
- ###### ***Données de la pièce :**
- Module normal : 10mm.
 - Nombre de dent : 83.
 - Angle d'hélice : 0.
 - Diamètre externe : 850mm.
 - Largeur de denture : 176mm.
 - Déport de profil : +0(denture NON Corrigé).
 - Départ de cycle : 800.
 - Hauteur de montage : 550mm.

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

***Données de coupe :**

-Profondeur totale taillage : 22,5mm.

-Nombre de passe : 02.

***La première passe :**

-Vitesse de coupe : 20m/min.

-Avance radiale : 0 (pénétration directe sur la pièce).

-Avance axiale : 5mm.

-Coef. d'avance d'entrée : +1.

-Coef. d'avance de sortie : 0.

***La deuxième passe :**

-Profondeur de la deuxième passe : 0.5mm (bonne finition).

-Vitesse de coupe : 40m/min.

-Avance radiale : 0.

-Avance axiale : 0.6mm.

IV-4.4.2.2. Programme de fraisage

N05 G54 G90 G42

N10 G96 S200 F0.5 M03

N15 T2 D2 M03

N20 G00 Z10

N25 G01 X352.952 Y19.671

N30 G02 X355.039 Y42.799 CR80

N35 G01 X369.971 Y104.997

N40 G03 X355.800 Y137.981 CR30

N45 G02 X328.804 Y153.567 CR60

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

N50 G01 X306.741 Y175.706
 N55 G01 X208.084 Y285.768
 N60 G02 CR60
 N65 G01 X232.674 Y275.239
 N70 G03 X295.609 Y268.117 CR30
 N75 G01 X295.609 Y245.858
 N80 G02 X316.994 Y160.089 CR80
 N85 G01 X321.793 Y146.327
 N90 G00 Z10
 N95 G01 X0 Y0
 N100 G00 Z100
 N105 M30

IV-4.4.3. La gamme d'usinage

N° de phase	La désignation des phases	Groupe machine	Code outil	Instrument de contrôle	Accessoire de montage	Condition de coupe			Temps estimé
						Vc	N	a	
10	Ebauche forgé Contrôle	Scie mécanique		L'aboratoire d'analyse structurelle					
20	TOURNAGE Montage en l'air Dresser les faces Charioter au Ø830*170		Outil à tronçonner Outil à dresser	PC	Mandrin	90 25	34 145	0.25 0.15	40H

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

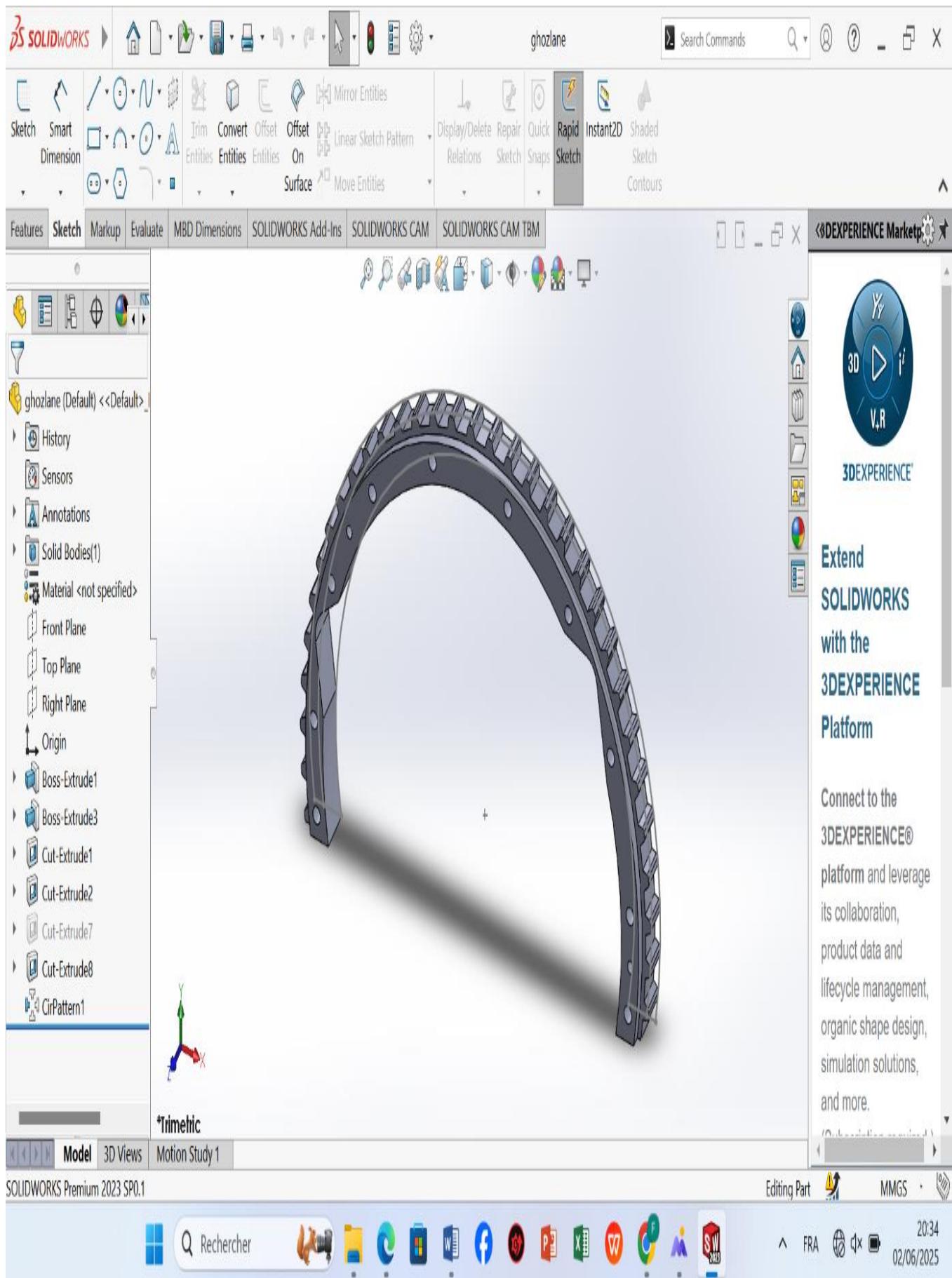
	<p>Percer et alésage centrale au Ø550 débouchant plein de matière</p> <p>Réaliser la gorge de dégagement Ø730*50 L=60</p> <p>Tourner la pièce mise le long L=170</p> <p>Contrôle</p>	Tour parallèle TV	<p>Outil à charioter</p> <p>Foret Ø</p> <p>Outil à aléser</p> <p>PC</p>		60	348	0.2	
30	<p>TAILLAGE</p> <p>Réaliser le taillage de la denture extérieur selon la fiche de données ; L=170</p> <p>Nombre de dent Z=83 ;</p> <p>Module m=10 ; Pas P=6.28 ;</p> <p>Angle de pression $\alpha=20^\circ$;</p> <p>da=850 ; df=805 ; dp=830 ;</p> <p>L'hauteur H=22.5</p> <p>Contrôle</p>	PE 1503		Mandrin	40	15	0.1	0.2

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

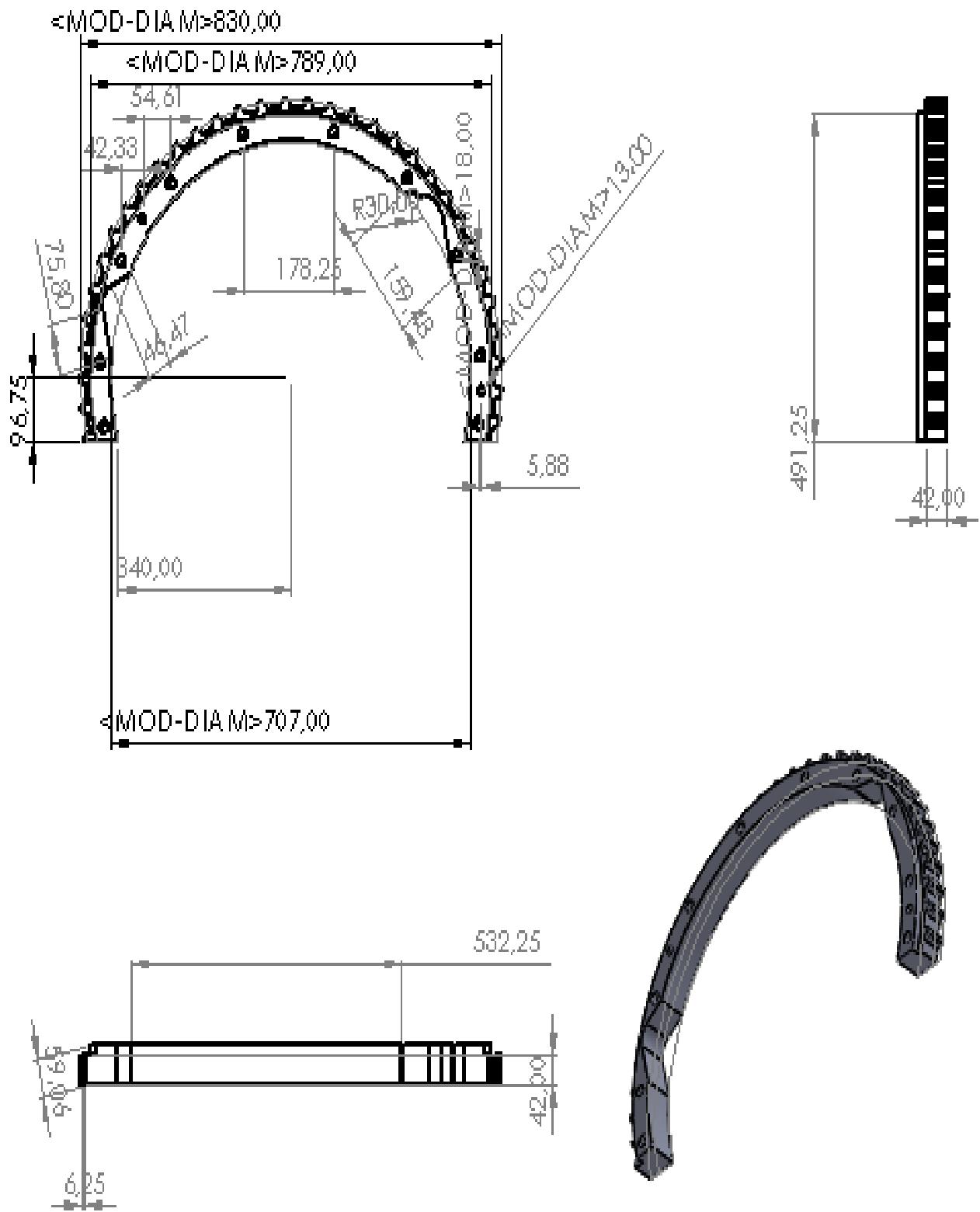
40	TOURNAGE Tronçonnage la pièce en 2 partie Dresser la face Aléser au Ø707 débouchant + ; ch=2x45° Charioter au : Ø789 x16 + ch 1x45° Tourner la pièce : mise long :L = 58 + ch1x45° sur l'alésage Contrôle	Tour 1M65	A tronçonner A dresser A plaquette A charioter		Mandrin PC	120 120	54 48	0.3 0.3	21H
50	FRAISAGE Percer 10 trous Ø18 débouchant entraxe Ø750 Percer 2 trous Ø13 Réaliser 2 évidement Contrôle	Fraisage CNC SXB	Foret HSS Fraise à rainure 3tailles		Service de contrôle	30 30 30	530 735 478		24H

**CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES
COURONNES DENTÉES A CNC**

CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC



CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC



CHAPITRE 4 : PROPOSITION D'UN PROGRAMME D'USINAGE DES COURONNES DENTÉES A CNC

Conclusion

Ce chapitre a permis d'illustrer concrètement l'application des concepts de l'industrie 4.0 à travers la programmation d'un usinage de couronnes dentées par commande numérique.

La structuration logique du programme CNC, la précision des instructions et la configuration des machines-outils sont essentielles pour garantir la qualité et la performance du processus. Cette démarche témoigne de l'importance croissante de la numérisation et de l'automatisation dans les ateliers modernes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que les Petites et Moyennes Entreprises (PME) et les Petites et Moyennes Industries (PMI) jouent un rôle fondamental dans le développement économique et social, tant au niveau national qu'international. Leur capacité à créer des emplois, à stimuler l'innovation et à dynamiser les territoires en fait des acteurs incontournables, surtout dans un contexte économique mondial marqué par une forte concurrence et des mutations rapides.

L'étude bibliographique a permis de mettre en lumière les nombreux défis auxquels ces entreprises sont confrontées, notamment en termes d'intégration industrielle, de gestion de la production, de maîtrise de la qualité et d'adoption des nouvelles technologies issues de l'industrie 4.0. Leur souplesse, leur réactivité et leur proximité avec les marchés locaux leur offrent cependant des avantages compétitifs majeurs, qui peuvent être renforcés par des politiques publiques cohérentes et un accompagnement ciblé.

L'introduction des concepts de fabrication intelligente et des technologies avancées, telles que les machines-outils à commande numérique (CNC), constitue une étape essentielle dans la modernisation des PMI. Ces innovations permettent non seulement d'améliorer la qualité des produits, mais aussi d'optimiser les processus de production, d'accroître la flexibilité et de répondre efficacement aux exigences d'un marché globalisé et exigeant.

L'usinage par enlèvement de copeaux demeure aujourd'hui un procédé largement utilisé dans l'industrie mécanique. Une pièce est considérée conforme uniquement si elle respecte précisément les spécifications du dessin technique, notamment en termes de dimensions, de forme, de position et de qualité de surface, correspondant à une classe de précision définie. La commande numérique (CN) s'est imposée comme une technologie incontournable dans le domaine de l'usinage. Elle permet de piloter automatiquement une machine à partir d'un programme informatique, sans intervention directe de l'opérateur durant l'exécution. Cette technologie a représenté un progrès majeur dans l'automatisation des machines-outils traditionnelles telles que les tours, fraiseuses, perceuses et aléseuses, leur permettant d'atteindre des niveaux de production et de qualité auparavant inaccessibles. La CN a aussi favorisé l'émergence de nouvelles machines polyvalentes comme les centres et unités d'usinage.

Ce projet de fin d'études nous a offert l'opportunité de renforcer nos connaissances théoriques tout en les mettant en pratique. Nous avons ainsi proposé à la direction des Ateliers Maghrébin Mécanique (AMM) d'optimiser les processus de fabrication en exploitant pleinement les capacités des machines-outils à commande numérique (MOCN). Les objectifs principaux de cette proposition sont :

- ✓ Accroître la flexibilité des opérations d'usinage ;
- ✓ Améliorer la qualité des pièces fabriquées ;
- ✓ Permettre la réalisation de pièces complexes, impossibles à produire sur des machines conventionnelles.

Pour accompagner cette évolution, plusieurs recommandations sont formulées :

- Définir une politique globale de l'entreprise intégrant production et maintenance ;
- Rentabiliser l'atelier d'usinage et moderniser le bureau technique ;

CONCLUSION

- Assurer une formation continue des opérateurs spécialisés en commande numérique.

En somme, la pérennité et le succès des PME/PMI reposent sur leur capacité à conjuguer adaptation organisationnelle, excellence technique et intégration dans des réseaux industriels élargis. Leurs contributions à la création de valeur ajoutée locale et à l'emploi en font des piliers essentiels pour toute stratégie de développement durable.

Il est donc impératif que les décideurs économiques, les institutions publiques et les acteurs privés travaillent de concert pour créer un environnement favorable à leur développement, en facilitant l'accès aux technologies, au financement, à la formation et à l'innovation.

Ainsi, la transformation progressive des PMI vers des entités intelligentes, compétitives et résilientes constitue une condition sine qua non pour relever les défis économiques du présent et construire un avenir industriel prospère et inclusif.

Références

- [1] Chara F. (s.d.). PME et PMI : différences, définitions et importance pour l'économie. Chara France. <https://charafrance.org/pme-et-pmi>
- [2] UNIVERSITÉ DU LITTORAL CÔTE D'OPALE-Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation. (2011, Mars). Les PME/PMI en Algérie : état des lieux (Cahiers du Lab.RII, n°238).
- [3] Nations Unies, Commission Economique pour l'Afrique, Bureau pour l'Afrique du Nord, XXIIIème réunion du Comité Intergouvernemental d'experts (CIE), Rabat (Maroc), 10-13 mars 2008.
- [4] Institut Royal des Études Stratégiques. (2023, octobre). L'industrie du futur ou X.0 (Version publique). Royaume du Maroc.
- [5] D. S. Landes, *The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*, 2nd edition. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, 2003.
- [6] E. G. West, “Literacy and the Industrial Revolution,” *The Economic History Review*, vol. 31, no. 3, pp. 369–383, 1978, doi: 10.2307/2598759.
- [7] J. J. Donovan, *The Second Industrial Revolution: Business Strategy and Internet Technology*, Facsimile, Subsequent edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall Ptr, 1997.
- [8] “City Life in the Late 19th Century | Rise of Industrial America, 1876-1900 | U.S. History Primary Source Timeline | Classroom Materials at the Library of Congress | Library of Congress,” Library of Congress, Washington, D.C. 20540 USA. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available: https://www.loc.gov/classroom-materials/united-states_history-primary-source-timeline/rise-of-industrial-america-1876-1900/city-life-inlate-19th-century/
- [9] “The Economics of Industrial Innovation,” MIT Press. Accessed: Dec. 19, 2022. [Online]. Available <https://mitpress.mit.edu/9780262561136/the-economics-of-industrial-innovation/>
- [10] B. Ślusarczyk, “INDUSTRY 4.0-ARE WE READY?” *Polish Journal of Management Studies*, vol. 17, Jun. 2018, doi: 10.17512/pjms.2018.17.1.19.
- [11] A. C. Pereira and F. Romero, “A review of the meanings and the implications of the industry 4.0 concept,” *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 1206–1214, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.032.
- [12] “Horizontal and Vertical Integration in Industry 4.0,” *Manufacturing Business Technology*. Accessed: Jan. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.mbtmag.com/business-intelligence/article/13251083/horizontal-and-vertical-integration-in-industry-40>
- [13] S. McLaughlin, “Horizontal and Vertical Integration in Industry 4.0 for Pharmaceutical and Medical Device Manufacturers,” SL Controls. Accessed: Jan. 03, 2023. [Online]. Available: <https://slcontrols.com/horizontal-and-vertical-integration-in-industry-4-0-for-pharmaceutical-and-medical-device-manufacturers/>

REFERENCES

- [14] Hassani, A. (2020, Aout). L'industrie 4.0 et les facteurs clés du succès de projet (Mémoire de maitrise, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [15] Inventiv-IT. (2024, 21 mars). Intelligence artificielle : définition, types et domaines. <https://inventiv-it.fr/intelligence-artificielle/>
- [16] Intel.fr. Intelligence artificielle (IA) dans le secteur de la fabrication. <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/learn/ai-in-manufacturing.html>
- [17] Vksapp. Par : Ben Baldwin (2024, 30 janvier). 10 exemples révolutionnaires d'IA dans l'industrie manufacturière. <https://vksapp.com/fr/blogue/examples-fabrication-ia#10exemplespassionnantsetrvolutionnairesdiadanslafabrication>
- [18] Wayden.fr. Rédigé par Mélanie (2024, 21 octobre) Intelligence artificielle et productivité : 7 leviers d'optimisation & risques. <https://www.wayden.fr/intelligence-artificielle-et-productivite-7-leviers-doptimisation>
- [19] Alegerglobal.fr. Smart Maintenance - Comment préparer votre maintenance pour l'avenir. <https://alegerglobal.com/fr/realite-augmentee/domaines-dapplication/maintenance-intelligente/>
- [20] Appvizer.fr. Par Coralie Petit (2024, 28 juin). Anticipez les pannes avec une plateforme de maintenance intelligente. <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gmao/plateforme-maintenance-intelligente#mb-0>
- [21] Talend.fr . Tout savoir sur le big data et son avenir. <https://www.talend.com/fr/resources/guide-big-data/>
- [22] Synox. (s.d.). Big data dans l'industrie 4.0 : transformer les données en décisions stratégiques. Synox. <https://synox.io/cat-industrie-4-0/big-data-industrie-4-0/>
- [23] Sculpteo. Le Guide Complet: Qu'est-ce que l'Impression 3D ? <https://www.sculpteo.com/fr/centre-apprentissage/les-bases-impression-3d/quest-ce-que-impression-3d/>
- [24] Dassault Systèmes. (s.d.). Avantages et inconvénients de l'impression 3D. 3DEXPERIENCE Make. <https://www.3ds.com/fr/make/solutions/blog/pros-and-cons-3d-printing>
- [25] Koneva, V. (2023, 21 janvier). Comment fonctionne une imprimante 3D ? Artec 3D. <https://www.artec3d.com/fr/learning-center/how-does-a-3d-printer-work>
- [26] Aniwaa team. (2021, 5 août). Les technologies d'impression 3D. Aniwaa. <https://www.aniwaa.com/fr/guide/imprimantes-3d/les-technologies-dimpression-3d/>
- [27] Koneva, Y. (2023, janvier 21). Comment fonctionne une imprimante 3D ? Artec 3D. <https://www.artec3d.com/fr/learning-center/how-does-a-3d-printer-work>
- [28] Namma. (s.d.). Les principaux secteurs industriels de l'impression 3D. <https://namma-france.com/impression-3d-secteurs-industriels/>
- [29] Koneva, Y. (2023, janvier 21). Comment fonctionne une imprimante 3D ? Artec 3D. <https://www.artec3d.com/fr/learning-center/how-does-a-3d-printer-work>

REFERENCES

- [30] Thomas B. (2021, 18 février). L'importance de l'impression 3D dans l'industrie 4.0. 3Dnatives. <https://3dnatives.com/impression-3d-industrie-4-0-180220219/>
- [31] Bpifrance. (s.d.). L'IoT au service de l'industrie : définition, technologies et cas concrets. Big média. <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/liot-au-service-de-lindustrie-definition-technologies-et-cas-concrets>
- [32] Bpifrance. (s.d.). L'IoT au service de l'industrie : définition, technologies et cas concrets. Big média. <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/liot-au-service-de-lindustrie-definition-technologies-et-cas-concrets>
- [33] SAP. (s.d.). Qu'est-ce que l' IoT et comment fonctionne-t-il ? Consulté le 24 mai 2025, à l'adresse <https://www.sap.com/france/products/technology-platform/what-is-iot.html>
- [34] Bpifrance. (s.d.). L'IoT au service de l'industrie : définition, technologies et cas concrets. Big média. <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/liot-au-service-de-lindustrie-definition-technologies-et-cas-concrets>
- [35] SAP. (s.d.). Qu'est-ce que l' IoT et comment fonctionne-t-il ? Consulté le 24 mai 2025, à l'adresse <https://www.sap.com/france/products/technology-platform/what-is-iot.html>
- [36] BELLOUFI Abderrahim, « Machines-outils à commandenumérique », Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2010.
<https://elearn.univ-ouargla.dz/2013-2014/courses/MOCN/.../CHAPITREIV.pdf>