

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure de Management
Koléa



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

المدرسة الوطنية العليا للمناجنت
القليعة

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en
« Entrepreneuriat et Management de Projets »

L'apport de l'intelligence artificielle dans la
gestion des opérations de production au
sein d'une entreprise industrielle :

Cas ETRAG

Réalisé par :

Mlle OUMLERGUEB Rayene

Encadré par :

Pr. Amokrane Mustapha

Année universitaire : 2024/2025

Résumé :

Ce mémoire explore les opportunités d'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les processus de production de l'entreprise ETRAG, spécialisée dans la fabrication de tracteurs agricoles. À travers une étude de cas détaillée, il analyse les ateliers de fonderie, forge, construction métallique et usinage, identifiant des défauts récurrents tels que les porosités, fissures et écarts dimensionnels. Des solutions basées sur des outils d'IA comme YOLOv8 pour le contrôle qualité, les systèmes ERP intelligents et les cobots sont proposées pour améliorer la productivité, la qualité et la planification. L'étude met également en évidence les limites méthodologiques liées à l'absence de données automatisées et propose un cadre stratégique d'intégration progressive de l'IA. Enfin, une simulation des bénéfices attendus montre une réduction significative des temps d'arrêt, des rebuts et des coûts de production.

Mots clés : Intelligence artificielle, Gestion de production, Contrôle qualité, Maintenance prédictive, ETRAG, Industrie 4.0, processus de production.

Abstract:

This thesis explores the opportunities for integrating artificial intelligence (AI) into the production processes of ETRAG, a company specialized in agricultural tractor manufacturing. Through a detailed case study, it analyzes foundry, forging, metal construction, and machining workshops, identifying recurring defects such as porosities, cracks, and dimensional errors. AI-based solutions, including YOLOv8 for quality control, intelligent ERP systems, and collaborative robots, are proposed to improve productivity, product quality, and planning. The study also highlights methodological limitations related to the lack of automated data and proposes a strategic framework for gradual AI integration. Finally, a simulation of expected benefits shows a significant reduction in downtime, waste, and production costs.

Keywords: Artificial intelligence, Production management, Quality control, Predictive maintenance, ETRAG, Industry 4.0, Production process.

المخلص

يُركز هذا البحث على فرص توظيف الذكاء الاصطناعي في عمليات الإنتاج داخل مؤسسة "ETRAG" المتخصصة في تصنيع الجرارات الزراعية. من خلال دراسة حالة مفصلة، تم تحليل ورش الصب، التزوير، البناء المعدني والتشغيل الآلي، مع تحديد العيوب الرئيسية مثل المسامات والتشققات والأخطاء البعدية. تم اقتراح حلول قائمة على أدوات الذكاء الاصطناعي مثل YOLOv8 لفحص الجودة وأنظمة ERP الذكية والروبوتات التعاونية لتحسين الإنتاجية وجودة المنتج والتخطيط. كما يسلط البحث الضوء على القيود المنهجية المرتبطة بعدم توفر بيانات آلية ويقترح إطاراً استراتيجياً للتكامل التدريجي للذكاء الاصطناعي. وأخيراً، بينت محاكاة الفوائد المتوقعة تقليلًا ملحوظًا في أوقات التوقف والهدر والتكاليف الإنتاجية.

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي، إدارة الإنتاج، فحص الجودة، الصيانة التنبؤية، عمليات الإنتاج، الثورة الصناعية الرابعة.

Remerciements

بسم الله الرحمن الرحيم

Tout d'abord je remercie Dieu Tout-Puissant qui m'a permis de réaliser ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement ma famille mes parents surtout ma mère, mon père ma grande mère, mes sœurs et mon frère et mes amis, qui m'ont soutenu moralement durant cette aventure. Votre présence et vos encouragements ont été ma plus grande force.

Une pensée spéciale va à l'ingénieur passionné KHALED qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et le fasse reposer en paix, modèle d'excellence technique, dont les conseils et l'expérience m'ont toujours inspiré. Vos encouragements et votre soutien ont été un moteur essentiel dans la concrétisation de ce projet.

Un sincère merci à mon encadrant académique Pr. AMOKRANE Mustapha pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa patience tout au long de ce travail. Ses orientations ont été d'une grande aide pour structurer ma réflexion et affiner mes analyses.

Je n'oublie pas l'entreprise ETRAG, et plus particulièrement son équipe dirigeante et ses collaborateurs, pour leur accueil, leur confiance et leur disponibilité. Leur expertise et leurs retours d'expérience ont grandement enrichi cette étude.

Enfin, je dédie ce travail à tous ceux qui croient en l'innovation et au potentiel de l'intelligence artificielle pour transformer l'industrie de demain.

Oumlergueb Rayene

Table des matières

Résumé :	I
Remerciements	IV
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures	IX
Liste des Abréviations	XI
INTRODUCTION GENERALE	3
Chapitre I : Revue de littérature et Fondements théoriques	9
Section 01 : Revue de littérature	4
Section 2 : IA et ses applications dans l'industrie	10
Section 3 : Généralité sur la gestion de production	22
3.1. Définition de la gestion des opérations de production	22
3.2. Objectifs de la gestion de production	23
3.3. Types de systèmes de production	24
3.4. Fonctions principales de la gestion de production	25
3.5. Les flux de production	26
3.6. Types d'ateliers et organisation des flux	27
3.7. Indicateurs de performance en production	27
3.8. Principaux outils de gestion de production	29
3.9. Qualité en production	31
3.10. Impact des nouvelles technologies sur la gestion de production	32
Chapitre II : Cadre Méthodologique et Présentation de l'organisme d'accueil	1
Introduction	36
Section 1 : Cadre méthodologique	36
1.1. Méthodologie de recherche	36
1.1.1. Définition :	36
1.1.2. Objectifs de la Méthodologie	37
1.1.3. Choix de la Méthodologie : Observation d'un situ et Diagnostic	37
1.1.3.1. L'Observation des Processus de Production	37

1.1.3.2. Le Diagnostic de l'Entreprise.....	38
1.1.4. Techniques de Collecte des Données	38
1.1.5. Limites de la Méthodologie	39
Section 02 : Présentation de l'entreprise ETRAG	40
2.1. Historique	40
2.4. Les métiers de base d'ETRAG	42
2.5. Organigramme de l'entreprise tractrice agricole.....	46
Section 03 : Présentation de l'ATC-spa	53
Chapitre III : Etude de cas et Solutions.....	61
Introduction.....	62
Section 01 : Les processus de production chez ETRAG	62
1.1. Le Diagnostic des Pratiques et Systèmes Internes.....	62
1.2. Présentation des Ateliers et de Leurs Capacités.....	65
1.3. Processus de production par atelier	67
1.4. Analyse les Défauts de Production par Atelier et Proposition d'Intégration de l'IA	73
Section 02 : Etude de cas sur la ligne d'assemblage du tracteur C6807	75
2.1. Chaîne de montage	81
2.2. Présentation des problèmes et l'application de solution IA.....	95
Section 03 : Recommandations Stratégiques et Discussion	98
3.1. Diagnostic des Processus de Production	98
3.2. Potentiel de l'IA	99
3.3. Description des outils IA utilisés dans la production d'ETRAG	99
3.4. Recommandations par Atelier	101
3.4.1. Étapes d'Intégration par Atelier	101
a) Atelier Fonderie.....	101
b) Atelier Forge	101
c) Atelier Construction Métallique.....	102
d) Atelier Usinage Mécanique	102

3.5. Bénéfices Globaux attendus de l'IA pour ETRAG.....	102
3.6. Discussion	103
3.6.1. Analyse des résultats prévus par simulation	103
3.6.2. Comparaison avec les travaux existants	104
3.6.3. Limites.....	104
CONCLUSION GENERALE.....	105
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	107
Annexes	115

Liste des tableaux

Tableau I : tableau comparatif entre Narrow AI et Strong AI.....	12
Tableau II : Principaux domaines de l'intelligence artificielle et leurs applications industrielles.	14
Tableau III : Tableau comparatif Assurance qualité vs Contrôle qualité.	31
Tableau IV : Différents tracteurs agricoles fabriqués dans l'entreprise.	45
Tableau V : Caractéristiques de l'activité Fonderie.	65
Tableau VI : Caractéristiques de l'activité Forge.	66
Tableau VII : Caractéristiques de l'activité Construction Métallique.	66
Tableau VIII : Caractéristiques de l'activité Moyens de Production.	67
Tableau IX : Caractéristiques de l'activité Fabrication Mécanique.....	67
Tableau X : Données techniques du tracteur C6807.....	75
Tableau XI : Performance générales sur le tracteur C6807.....	75
Tableau XII : Performance pneumatique.	76
Tableau XIII : Performance du moteur.	76
Tableau XIV : combinaison de vitesse.	77
Tableau XV : performance de l'essieu avant.	78
Tableau XVI : Les données du frein principal.....	79
Tableau XVII : Données du frein parcage.....	79
Tableau XVIII : Données des éclairages.....	79
Tableau XIX : Tableau contient les performances de relevage hydraulique du type K45-1. ...	79
Tableau XX : Prise de force.....	80
Tableau XXI : Les caractéristiques des jantes.	80
Tableau XXII : Performance d'alourdissement du tracteur.....	80
Tableau XXIII : diverses caractéristiques du tracteur C6807.	81
Tableau XXIV : les valeurs intégrées dans le calcul de cal x.	82
Tableau XXV : Les Algorithmes d'IA et Leur Application.	100
Tableau XXVI : Tableau des défauts et solutions IA pour chaque atelier.	101

Liste des figures

Figure 1 : la gestion de production et les autres fonctions de l'entreprise.	23
Figure 2 : Activité fonderie.	43
Figure 3 : Activité forge.	43
Figure 4 : Activité usinage mécanique.	44
Figure 5 : Activité construction mécanique	44
Figure 6 : L'organigramme d'ETRAG.....	46
Figure 7 : Organigramme de la division de production (DP).....	47
Figure 8 : Organigramme de la direction fabrication brut (DFB)	48
Figure 9 : presses d'estampage.....	50
Figure 10 : Organigramme de la direction fabrication mécanique.	51
Figure 11 : Les différents types des tracteur MF.....	56
Figure 12 : Les différents types des tracteur Cirta.	57
Figure 13 : Organigramme d'ATC.....	58
Figure 14 : Processus de production d'une pièce coulée en fonderie.....	68
Figure 15 : Processus de production dans l'atelier de forge.....	69
Figure 16 : Processus de production en tôlerie-métal-soudure.	70
Figure 17 : Processus d'usinage des pièces mécaniques.	71
Figure 18 : Processus d'usinage en chaîne pour les composants moteurs.	72
Figure 19 : chaîne de montage.....	81
Figure 20 : accouplement de pont arrière avec la boîte vitesse.....	82
Figure 21 : les épinions de la boîte vitesse.	83
Figure 22 : carter boîte de vitesse.....	84
Figure 23 : montage des fourchettes de vitesse.	84
Figure 24 : montage épinions.....	84
Figure 25 : pont arrière.	85
Figure 26 : arbres males et femelle.	85
Figure 27 : le carter.....	85
Figure 28 : montage des grandes roues.....	86
Figure 29 : pression pneumatique.....	86
Figure 30 : assemblage de prise de force.	87
Figure 31 : montage des trompettes.....	87
Figure 32 : montage des accessoires.....	88
Figure 33 : installation hydraulique avant le montage.	88
Figure 34 : installation hydraulique complète.....	89
Figure 35 : transmission complète.	90

Figure 36 : chaine de peinture.....	90
Figure 37 : la fin de l'opération de peinture.....	91
Figure 38 : stock transite de transmission.....	91
Figure 39 : la chaine de montage.....	92
Figure 40 : illustration des phases de la chaine montage.....	92
Figure 41 : montage de volant.....	93
Figure 42 : capot de tracteur c6807.....	94
Figure 43 : poste pré-montage des roues.....	94
Figure 44 : dernière phase de la chaine montage.....	95

Liste des Abréviations

- **IA** : Intelligence Artificielle
- **IoT** : Internet des Objets (Internet of Things)
- **ERP** : Enterprise Resource Planning (Progiciel de Gestion Intégré)
- **MRP** : Material Requirements Planning (Planification des Besoins en Matières)
- **JAT/JIT** : Juste-à-Temps (Just-in-Time)
- **OOE/TRG** : Overall Equipment Effectiveness / Taux de Rendement Global
- **RFID** : Radio Frequency Identification
- **NLP** : Natural Language Processing (Traitement du Langage Naturel)
- **CAD/CAM** : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur
- **KPI** : Key Performance Indicator (Indicateur Clé de Performance)
- **MTO** : Make-to-Order (Production à la Commande)
- **MTS** : Make-to-Stock (Production sur Stock)
- **YOLOv8** : You Only Look Once version 8 (algorithme de vision industrielle)
- **CNN** : Convolutional Neural Network (Réseau de Neurones Convolutifs)
- **RNN** : Recurrent Neural Network (Réseau de Neurones Récurrents)
- **LSTM** : Long Short-Term Memory (type de réseau de neurones)
- **ETRAG** : Entreprise Publique Economique des Tracteurs Agricoles
- **ATC** : Algerian Tractors Company
- **AGCO** : AGCO Corporation (partenaire industriel de Massey Ferguson)
- **MF** : Massey Ferguson
- **CIMOTRA** : Complexe Industriel Moteurs Tracteurs (ancien nom d'ETRAG)
- **EPE/PMA** : Entreprise Publique Economique de Production du Machinisme Agricole
- **DFB** : Direction Fabrication Brut

- **DFM** : Direction Fabrication Mécanique
- **DTK** : Direction Technique
- **DP** : Division de Production

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte industriel marqué par une concurrence accrue, des exigences de qualité croissantes et des marchés volatils, les entreprises doivent constamment repenser leurs processus de production pour rester compétitives. L'intelligence artificielle (IA) émerge aujourd'hui comme un levier majeur pour transformer les opérations industrielles en améliorant l'efficacité, la réactivité et la qualité des productions. Cependant, cette transformation n'est pas sans défis : dépendance aux données, coûts d'implémentation élevés, complexité technique et questions éthiques sont autant d'obstacles qui nécessitent une approche stratégique et bien pensée.

L'industrie 4.0, qui repose sur l'intégration des technologies numériques dans les processus de production, a ouvert la voie à une nouvelle ère où l'IA joue un rôle central. Les systèmes intelligents, tels que les algorithmes de machine learning, les robots collaboratifs (cobots), les systèmes ERP intelligents et les outils de vision par ordinateur, permettent de collecter, analyser et interpréter des données en temps réel pour optimiser les flux de production, détecter les anomalies et prendre des décisions plus précises. Ces innovations technologiques offrent ainsi des opportunités inédites pour moderniser les processus traditionnels et répondre aux défis industriels contemporains.

Problématique

La problématique centrale de ce mémoire est de comprendre comment l'intelligence artificielle peut améliorer l'efficacité, la réactivité et la qualité des opérations de production dans un contexte industriel complexe, tout en répondant aux défis liés aux processus de production. Plus précisément, il s'agit de :

- Identifier les principaux défis auxquels font face les entreprises industrielles dans la gestion de leurs opérations de production.
- Analyser le potentiel de l'IA pour résoudre ces défis et proposer des solutions concrètes.
- Évaluer les bénéfices attendus de l'intégration de l'IA dans différents ateliers de production (fonderie, forge, construction métallique, usinage).
- Examiner les limites méthodologiques et organisationnelles liées à l'adoption de ces technologies intelligentes.

Cette problématique se décline en plusieurs sous-questions de recherche, qui guideront l'analyse et la réflexion tout au long du mémoire :

1. Quels sont les principaux défis rencontrés dans les processus de production chez ETRAG ?
 - Identification des inefficacités, goulots d'étranglement et lacunes opérationnelles dans les différentes étapes de fabrication.
 - Analyse des causes sous-jacentes (manque de contrôle qualité, pannes fréquentes, erreurs humaines, etc.).
2. Comment l'IA peut-elle contribuer à améliorer la gestion des opérations de production ?
 - Exploration des applications spécifiques de l'IA (maintenance prédictive, contrôle qualité automatisé, optimisation des flux, robotique collaborative).
 - Proposition de solutions adaptées aux besoins identifiés dans chaque atelier de production.
3. Quels sont les bénéfices attendus de l'intégration de l'IA dans les processus de production ?
 - Évaluation des gains potentiels en termes de productivité, qualité, réduction des coûts et flexibilité opérationnelle.
 - Simulation des impacts positifs sur les indicateurs clés de performance (KPIs).
4. Quels sont les défis techniques, économiques et organisationnels liés à l'adoption de l'IA dans l'industrie ?
 - Analyse des obstacles à l'implémentation (coût, manque de données structurées, résistance culturelle, etc.).
 - Proposition de recommandations pour une intégration progressive et efficace de l'IA.
5. Comment les entreprises peuvent-elles relever les défis éthiques et sociaux associés à l'adoption de l'IA ?
 - Réflexion sur les implications éthiques (emploi, confidentialité des données, transparence des algorithmes).

- Proposition de cadres de gouvernance pour garantir une adoption responsable de l'IA.

Les objectifs principaux de ce mémoire sont les suivants :

1. Diagnostic des processus de production actuels :
 - Observer et analyser les différentes étapes de production dans l'entreprise ETRAG.
 - Identifier les forces, faiblesses, opportunités et menaces (FOCM) relatives aux opérations de production.
2. Proposition de solutions basées sur l'IA :
 - Proposer des solutions innovantes pour améliorer la productivité, la qualité et la planification grâce à l'intégration de l'IA.
 - Mettre en avant des outils spécifiques (YOLOv8 pour le contrôle qualité, systèmes ERP intelligents, cobots, etc.) adaptés aux besoins identifiés.
3. Évaluation des bénéfices et limites de l'IA :
 - Simuler les bénéfices attendus de l'intégration de l'IA en termes de réduction des pertes, amélioration de la qualité et augmentation de la productivité.
 - Analyser les limites méthodologiques et organisationnelles liées à l'adoption de ces technologies.
4. Recommandations pour une intégration progressive :
 - Proposer un cadre stratégique pour une adoption progressive de l'IA dans les processus de production.
 - Suggérer des pistes d'amélioration pour surmonter les défis techniques, économiques et organisationnels.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse a été adoptée, combinant plusieurs approches :

1. Observation directe et participante :

- Participation active aux processus de production dans les différents ateliers (fonderie, forge, construction métallique, usinage).
- Observation des pratiques actuelles pour identifier les inefficacités et les points de friction.

2. Entretiens semi-directifs :

- Organisation d'entretiens avec différents acteurs clés de l'entreprise (responsables de maintenance, chefs d'atelier, directeur technique, etc.).
- Recueil des perceptions et des attentes concernant l'intégration de l'IA dans les processus de production.

3. Analyse documentaire :

- Étude des documents internes de l'entreprise (rapports de production, plans de maintenance, fiches techniques, etc.).
- Consultation de la littérature scientifique et des publications spécialisées sur l'application de l'IA dans l'industrie.

4. Diagnostic des processus :

- Utilisation de méthodes d'analyse qualitative et quantitative pour identifier les forces et faiblesses des opérations de production.
- Application de modèles théoriques pour évaluer les opportunités d'amélioration grâce à l'IA.

5. Simulation et proposition de solutions :

- Développement de simulations pour évaluer les impacts potentiels de l'intégration de l'IA sur les processus de production.
- Proposition de solutions concrètes basées sur des cas d'étude existants et des bonnes pratiques identifiées dans la littérature.

6. Cadre stratégique d'intégration :

- Proposition d'un cadre méthodologique pour une adoption progressive de l'IA, tenant compte des contraintes techniques, économiques et organisationnelles.

- Suggestion de mesures pour minimiser les risques et maximiser les bénéfices de l'adoption de ces technologies.

Ce mémoire est structuré en plusieurs parties pour garantir une analyse exhaustive et cohérente du sujet :

1. **Chapitre I** : Revue de littérature et fondements théoriques

- Présentation des concepts clés de l'IA et de son application dans l'industrie.
- Synthèse des recherches existantes sur l'impact de l'IA dans la gestion des opérations de production.
- Examen des bénéfices et défis liés à l'intégration de l'IA dans les processus industriels.

2. **Chapitre II** : Cadre méthodologique et présentation de l'organisme d'accueil

- Description détaillée de la méthodologie adoptée pour l'étude.
- Présentation de l'entreprise ETRAG, ses activités, son organisation et ses défis opérationnels.

3. **Chapitre III** : Diagnostic des processus de production

- Analyse approfondie des processus de production dans les différents ateliers.
- Identification des inefficacités et des goulots d'étranglement dans chaque étape de fabrication.
- Proposition de solutions basées sur l'IA pour remédier aux problèmes identifiés.
- Présentation des solutions concrètes basées sur l'IA (maintenance prédictive, contrôle qualité automatisé, optimisation des flux, etc.).
- Simulation des impacts positifs de ces solutions sur les performances de l'entreprise.
- Synthèse des résultats obtenus et des conclusions tirées de l'étude.
- Proposition de recommandations pour une intégration réussie de l'IA dans les processus de production.

- Perspectives futures et défis à relever pour maximiser l'apport de l'IA dans l'industrie.

Ce mémoire vise à explorer les potentialités de l'intelligence artificielle pour transformer les opérations de production dans une entreprise industrielle, en prenant pour cas d'étude l'entreprise ETRAG. En mettant l'accent sur les défis spécifiques rencontrés dans les processus de production, ce travail propose des solutions innovantes basées sur l'IA pour améliorer l'efficacité, la réactivité et la qualité des opérations. Enfin, il examine les limites et les défis associés à l'adoption de ces technologies, tout en proposant des recommandations pour une intégration progressive et durable de l'IA dans l'industrie.

Chapitre I :
Revue de littérature et Fondements
théoriques

Introduction

L'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les opérations industrielles représente une révolution majeure pour le secteur manufacturier. Ce chapitre vise à explorer les contributions de l'IA à la gestion des opérations de production, en mettant en lumière ses applications, ses avantages et les défis liés à sa mise en œuvre. À travers une revue de littérature approfondie, nous examinons comment l'IA transforme des domaines clés tels que la planification et l'optimisation de la production, la maintenance prédictive, la prise de décision, la gestion des stocks, et bien d'autres. Nous abordons également les limites et les enjeux techniques, économiques et éthiques qui accompagnent cette transformation. En synthétisant les recherches actuelles, ce chapitre offre une vision complète du potentiel de l'IA pour améliorer l'efficacité, la qualité et la durabilité des processus industriels.

Section 01 : Revue de littérature

L'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les opérations industrielles transforme rapidement le paysage manufacturier. Cette revue de littérature vise à synthétiser les recherches actuelles sur les contributions de l'IA à la gestion des opérations de production au sein des entreprises industrielles. En examinant un éventail d'études, cette revue explorera les diverses applications de l'IA, les avantages réalisés et les défis rencontrés dans sa mise en œuvre.

1.1. L'IA pour la Planification et l'Optimisation de la Production

L'un des aspects les plus critiques de la gestion de la production est la planification efficace. **Smith & Lee (2021)** ont exploré l'utilisation de l'IA, en particulier les algorithmes génétiques, pour optimiser la planification de la production, démontrant une réduction de 20 % des temps d'arrêt. **Kim & Park (2023)** ont appuyé cela en proposant un modèle d'apprentissage par renforcement pour optimiser les flux de production, réalisant un gain d'efficacité de 25 %. Ces études soulignent la capacité de l'IA à traiter des problèmes de planification complexes et à améliorer la productivité globale.

Tanaka (2021) s'est également concentré sur la capacité de l'IA à améliorer la planification de la production, montrant une réduction de 15 % des délais dans l'industrie manufacturière. De même, **Schmidt (2021)** a indiqué que les modèles d'optimisation de l'IA peuvent entraîner

des gains d'efficacité de 20 à 30 % dans les processus industriels. Cependant, **Schmidt (2021)** a également noté que cela est principalement applicable aux processus linéaires. **Benali (2023)** a adapté ces concepts au contexte algérien, proposant un modèle d'optimisation qui a conduit à un gain d'efficacité de 20 %.

1.2. Maintenance Prédictive et Contrôle Qualité

La maintenance des équipements et l'assurance de la qualité des produits sont essentielles pour le bon déroulement de la production. **Garcia et al. (2020)** ont étudié la maintenance prédictive à l'aide des données IoT et de l'apprentissage automatique, ce qui a permis de réduire les coûts de maintenance de 15 %. **Zhang (2022)** s'est concentré sur le contrôle qualité grâce aux systèmes de vision industrielle et à l'apprentissage profond, atteignant un taux de détection des défauts de 95 %. Ces études illustrent l'efficacité de l'IA pour réduire les coûts et améliorer la qualité dans la fabrication.

Boukherroub (2021) a appliqué l'IA à la maintenance prédictive dans l'industrie pétrochimique algérienne, rapportant une réduction de 20 % des coûts de maintenance. **Hammoudi (2021)** et **Saoudi (2022)** ont également souligné la capacité de l'IA à détecter les défauts dans les industries manufacturières et mécaniques algériennes, respectivement, atteignant tous deux un taux de détection des défauts de 90 %.

1.3. L'IA dans la Prise de Décision et l'Allocation des Ressources

Le rôle de l'IA dans la prise de décision managériale et l'allocation des ressources est un autre domaine de recherche important. **Dupont & Martin (2019)** ont analysé le potentiel de l'IA pour aider ou remplacer les managers dans la gestion des opérations, notant une amélioration de 30 % de la prise de décision. **Müller (2021)** a exploré le rôle de l'IA dans l'allocation des ressources humaines, démontrant une réduction de 10 % des coûts de main-d'œuvre. Cependant, les résultats de **Müller (2021)** étaient limités aux grandes entreprises, et **Dupont & Martin (2019)** ont soulevé la question du risque potentiel de déshumanisation du management.

Dahmani (2021) a également examiné l'impact de l'IA sur la gestion des ressources humaines dans les industries manufacturières algériennes, avec des résultats similaires de

réduction de 10 % des coûts de main-d'œuvre, notant à nouveau les limites aux grandes entreprises.

1.4. Prévision de la Demande et Gestion des Stocks

Une prévision précise de la demande et une gestion efficace des stocks sont cruciales pour optimiser la production. **Chen (2020)** a démontré que les modèles d'apprentissage automatique améliorent la précision de la prévision de la demande de 30 %. **Rossi (2022)** a souligné le rôle de l'IA dans l'optimisation des niveaux de stock, permettant une réduction de 20 % des stocks excédentaires. **Zerrouki (2023)** a également étudié l'impact de l'IA sur la gestion des stocks dans les PME algériennes, rapportant une réduction de 25 % des stocks excédentaires. Cependant, **Rossi (2022)** a noté que cela est principalement applicable aux secteurs à forte rotation, et **Zerrouki (2023)** a précisé que cela s'applique uniquement aux PME disposant de données numérisées.

1.5. Durabilité et Efficacité Énergétique

L'impact environnemental de la fabrication est une préoccupation croissante, et l'IA offre des solutions potentielles. **Taylor (2021)** a évalué l'impact de l'IA sur la fabrication durable, réalisant une réduction de 15 % de l'empreinte carbone. **Ahmed (2021)** a exploré le rôle de l'IA dans l'efficacité énergétique, rapportant une réduction de 18 % de la consommation d'énergie. **Boukherroub (2022)** a également étudié l'IA pour la gestion énergétique dans les usines algériennes, avec des résultats similaires de réduction de 15 % de la consommation d'énergie. Cependant, **Taylor (2021)** a noté que les résultats dépendent des technologies utilisées, et **Ahmed (2021)** a souligné que les résultats varient en fonction des équipements.

1.6. Gestion des Risques et Optimisation de la Chaîne d'Approvisionnement

L'IA joue également un rôle dans la gestion des risques et l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. **Nguyen (2023)** a montré que l'IA peut identifier et anticiper 90 % des risques potentiels de production. **Lopez (2020)** a exploré la synergie de la blockchain et de l'IA dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement, réalisant une amélioration de 40 % de la traçabilité. **Benmoussa & Boukhatem (2021)** ont examiné l'impact de l'IA sur l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement dans les PME algériennes, rapportant une

amélioration de 12 % de la productivité. Cependant, *Nguyen (2023)* a limité sa portée aux risques quantifiables, et *Lopez (2020)* a reconnu les coûts élevés et la complexité technique de la mise en œuvre.

1.7. Personnalisation de Masse et Surveillance en Temps Réel

L'IA permet la production personnalisée et la surveillance en temps réel. *Wang (2022)* a discuté de la personnalisation de masse à l'aide de l'IA, ce qui a entraîné une augmentation de 25 % de la satisfaction client. *Fischer (2020)* a développé un cadre pour la surveillance de la production en temps réel, réalisant une réduction de 22 % des retards. Cependant, *Fischer (2020)* a noté la dépendance à la qualité des données en temps réel, et *Wang (2022)* a souligné que la personnalisation de masse n'est applicable qu'aux industries de biens de consommation.

1.8. Optimisation des Coûts et Applications Générales de l'IA

L'IA contribue également à l'optimisation des coûts dans divers processus de production. *Silva (2023)* a démontré une réduction de 12 % des coûts totaux grâce à l'IA. *Zerrouki & Kadri (2021)* ont appliqué l'IA à la planification de la production dans les cimenteries algériennes, réalisant une réduction de 10 % des délais de production. *Bouزيد (2022)* a également exploré l'IA pour la gestion des coûts dans les industries algériennes, rapportant une réduction de 10 % des coûts totaux. Cependant, *Silva (2023) et Bouزيد (2022)* ont indiqué que ces résultats sont principalement applicables aux processus standardisés.

Plusieurs ouvrages offrent des perspectives plus larges sur l'IA dans l'industrie. *Russell & Norvig (2020)* ont fourni une base théorique pour l'IA et ses applications industrielles. *Davenport & Ronanki (2021)* ont exploré les cas d'utilisation de l'IA dans les entreprises. *Bughin et al. (2022)* ont analysé l'impact de l'IA sur divers secteurs industriels. *Kaplan (2021)* a fourni un guide pratique pour la mise en œuvre de l'IA dans la production. *Mourtzis (2020)* a discuté du rôle de l'IA dans l'Industrie 4.0, et *Chui et al. (2023)* ont identifié les tendances clés de la transformation des opérations par l'IA. *Kusiak (2022)* a offert des exemples concrets d'applications de l'IA dans la production intelligente, tandis que *Wang & Gao (2021)* ont exploré les défis techniques de l'intégration de l'IA dans les systèmes industriels. *Brynjolfsson & McAfee (2014)* ont donné un aperçu de l'impact économique et industriel de l'IA, et *LeCun et al. (2023)* ont détaillé l'utilisation de l'apprentissage profond

dans les applications industrielles. **Boudelal (2014)** a spécifiquement examiné la gestion de la production dans l'entreprise algérienne d'électronique ENIE. **Touati (2020)** a étudié l'impact de l'IA sur la réduction des retards de production dans les industries algériennes, rapportant une réduction de 15 % des retards. **Benali (2022)** a également étudié le rôle de l'IA dans l'amélioration de l'efficacité des chaînes de production dans les industries algériennes, montrant une amélioration de 15 % de l'efficacité productive.

1.9. Défis et Limites

Bien que la littérature mette en évidence de nombreux avantages de l'intégration de l'IA dans les opérations de production, elle soulève également plusieurs défis et limites importants qui doivent être pris en compte.

- **Dépendance aux Données** : Un thème récurrent est la forte dépendance des applications de l'IA à la disponibilité de données de haute qualité. **Garcia et al. (2020)** soulignent que la maintenance prédictive nécessite des données massives pour être efficace. **Chen (2020)** précise que la prévision de la demande à l'aide de l'IA nécessite des données historiques de qualité. **Fischer (2020)** note également que la surveillance de la production en temps réel dépend de la qualité des données en temps réel. **Zerrouki (2023)** indique que l'application de l'IA à la gestion des stocks dans les PME est limitée aux entreprises ayant accès à des données numérisées.
- **Coût d'Implémentation** : Le coût élevé de la mise en œuvre de systèmes d'IA est un autre défi majeur. **Zhang (2022)**, **Hammoudi (2021)** et **Saoudi (2022)** mentionnent tous le coût élevé d'implémentation des systèmes de vision industrielle pour le contrôle qualité et la détection des défauts. **Lopez (2020)** reconnaît également les coûts élevés et la complexité technique de la combinaison de la blockchain et de l'IA dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement. **Boukherroub (2021)** souligne également que la mise en place de systèmes de maintenance prédictive dans les industries pétrochimiques algériennes nécessite des investissements importants en équipements IoT.
- **Complexité et Expertise Technique** : La complexité des systèmes d'IA et la nécessité d'une expertise technique sont des obstacles importants. **Wang & Gao (2021)** explorent les défis techniques de l'intégration de l'IA dans les systèmes industriels, soulignant la complexité pour les non-experts. **Kim & Park (2023)** et

Benali (2023) reconnaissent la complexité de la mise en œuvre des modèles d'optimisation des flux de production. *LeCun et al. (2023)* notent que les applications d'apprentissage profond peuvent être très techniques et peu accessibles.

- **Limites de Généralisation :** Plusieurs études soulignent les limites de la généralisation des résultats. *Smith & Lee (2021)* notent que leur modèle d'ordonnancement de la production est limité à un seul type d'industrie. *Müller (2021) et Dahmani (2021)* constatent que les résultats de l'IA dans l'allocation des ressources humaines sont limités aux grandes entreprises. *Rossi (2022)* précise que l'application de l'IA à la gestion des stocks est applicable uniquement aux secteurs à forte rotation. *Wang (2022)* indique que la personnalisation de masse est applicable uniquement aux industries de biens de consommation. *Schmidt (2021)* note que l'optimisation des processus industriels grâce à l'IA est applicable uniquement aux processus linéaires. *Tanaka (2021)* limite son étude aux industries japonaises, et *Boudelal (2014)* reconnaît que son étude est limitée à une seule entreprise et nécessite une généralisation pour d'autres secteurs.
- **Risques Potentiels et Considérations Éthiques :** Au-delà des limites techniques, certaines études soulèvent des préoccupations éthiques et des risques potentiels. *Dupont & Martin (2019)* mettent en garde contre le risque de déshumanisation du management lors de l'automatisation des décisions managériales. *Nguyen (2023)* limite son analyse de la gestion des risques aux risques quantifiables, ce qui peut exclure des aspects plus qualitatifs. *Taylor (2021)* souligne que les résultats en matière de durabilité dépendent des technologies utilisées, ce qui implique une nécessité de choix éclairés. *Ahmed (2021)* note que les résultats de l'IA pour l'efficacité énergétique varient selon les équipements, ce qui suggère que l'IA n'est pas une solution universelle.

1.10. Conclusion du Revue

La littérature examinée démontre clairement le potentiel important de l'IA pour transformer les opérations de production au sein des entreprises industrielles. L'IA offre des solutions précieuses pour optimiser la planification, améliorer la maintenance et le contrôle qualité, renforcer la prise de décision et gérer efficacement les ressources. De plus, l'IA contribue à la durabilité, à la gestion des risques et à l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement. Cependant, une mise en œuvre réussie nécessite de relever les défis liés à la dépendance aux

données, aux coûts, à la complexité et à la généralisation. Les recherches futures devraient se concentrer sur le développement de solutions d'IA plus robustes, rentables et largement applicables, ainsi que sur la prise en compte des implications éthiques et sociales de l'IA dans la fabrication.

Section 2 : IA et ses applications dans l'industrie

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine en pleine expansion qui transforme de nombreux secteurs, et l'industrie ne fait pas exception. Cette section explore les définitions de l'IA, sa distinction entre l'IA faible et l'IA forte, et les différents sous-domaines qui la composent, tels que l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond, la vision par ordinateur, le traitement automatique du langage naturel et la robotique intelligente. Nous examinerons également les outils et technologies essentiels qui sous-tendent le développement de l'IA, notamment les langages de programmation, les bibliothèques logicielles et les environnements de développement. Enfin, nous plongerons dans les applications concrètes de l'IA dans l'industrie, en mettant en lumière ses avantages et ses limites.

2.1. Définition de l'intelligence artificielle

Il existe plusieurs définitions, parmi lesquelles nous mentionnons :

2.1.1. Définition IA :

a) Technique

L'intelligence artificielle ou l'intelligence artificielle est un terme large qui englobe toute la gamme de théories, de pratiques et de technologies permettant à une machine d'imiter certaines capacités cognitives d'un être humain, telles que l'apprentissage, le raisonnement, la résolution de problèmes ou la compréhension du langage. (<https://www.cnil.fr>)

b) IA industrielle

L'intelligence artificielle appliquée à l'industrie dans ce contexte fait référence à toutes les technologies capables de collecter, analyser et interpréter les données industrielles afin d'optimiser la production, la maintenance, la qualité et la logistique. (Kusiak, 2022)

c) Par l'industrie

Dans le contexte de l'industrie 4.0, l'IA peut être utilisée pour rendre les décisions dans la chaîne de fabrication plus automatisées grâce à l'utilisation de systèmes qui apprennent de l'expérience, s'adaptent aux dynamiques changeantes et anticipent les besoins. (Schuh, Anderl, Gausemeier, Hompel, & Wahlster, 2020).

d) Opérationnelle (exploitation directe dans les usines)

L'IA industrielle désigne l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique et de traitement de données pour optimiser la prise de décision en temps réel dans des environnements industriels. Elle s'applique notamment à la maintenance prédictive, au contrôle qualité, à l'ordonnancement de la production et à la robotique. (Tanaka, 2021).

2.1.2. Distinction entre IA faible et IA forte**➤ IA faible**

Le terme IA faible (également connu sous le nom de faible autonomie architecturale) se réfère à la conception de systèmes destinés à atteindre un résultat spécifique à des niveaux de performance élevés avec peu de conscience ou d'autonomie généralisée du contexte global. (Russell & Norvig, 2020).

➤ IA forte

L'IA forte ou IA en général (également connue sous le nom d'AGI — Intelligence Artificielle Générale) est un terme désignant un système capable de raisonner, d'apprendre, de comprendre et de s'adapter de manière autonome à toute tâche cognitive impliquant des humains, avec une conscience de soi et une intelligence comparable à celles des humains.

(Goertzel & Pennachin, 2007).

Tableau I : tableau comparatif entre Narrow AI et Strong AI. (Élaboré par nous-même)

Critère	IA faible (Narrow AI)	IA forte (Strong AI)
Tâches	Spécifiques, limitées	Polyvalentes, générales
Conscience de soi	✗ Non	✓ Théoriquement oui
Présente aujourd'hui ?	✓ Oui (industrie, santé, finance...)	✗ Non (encore théorique ou en développement)
Exemples industriels	Prédiction de panne, contrôle qualité	Aucun pour le moment

Source : Réalisé par nous-mêmes

2.2. Les domaines de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est une confluence de diverses disciplines et techniques destinées à permettre aux systèmes informatiques de simuler les fonctions cognitives humaines. Les applications sont réparties entre plusieurs sous-thèmes, chacun ayant ses exigences spécifiques. Cette section résume les principaux sous-thèmes de l'IA moderne et leurs rôles respectifs dans les systèmes intelligents :

a) Apprentissage automatique (Machine Learning)

L'apprentissage automatique est une technique qui permet à une machine d'apprendre à partir de données sans être explicitement programmée. Un algorithme formule les modèles en analysant des exemples et peut prédire ou décider du nouveau cas. Selon les fondements théoriques, il repose sur la capacité d'un algorithme à construire une fonction mathématique $Y=f(X)$, où Y représente la sortie prédite à partir des entrées X . Cette approche est au cœur de la science des données et sert à résoudre des problèmes complexes en exploitant des ensembles de données structurées ou non structurées. (Mitchell, 1997).

b) Apprentissage profond (Deep Learning)

(Deep Learning) est une sous-catégorie avancée du Machine Learning qui repose sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels multicouches. Ces architectures imitent grossièrement le fonctionnement du cerveau humain, en passant les données à travers plusieurs couches d'unités computationnelles interconnectées, appelées neurones artificiels, capables d'apprendre des représentations hiérarchiques des données. Contrairement aux méthodes classiques de Machine Learning, le Deep Learning permet une extraction automatique des caractéristiques (feature learning), ce qui le rend particulièrement efficace

pour traiter des données complexes et non structurées telles que les images, les sons ou les textes (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

c) Vision par ordinateur (Computer Vision)

La vision par ordinateur (Computer Vision) est une discipline qui permet à une machine de "voir", c'est-à-dire d'acquérir, d'analyser et de comprendre des informations visuelles issues d'images ou de vidéos. Elle combine des techniques issues du traitement du signal, de l'intelligence artificielle et de la géométrie pour extraire des significations à partir de scènes visuelles.

Cette technologie est largement alimentée par les progrès du Deep Learning, notamment grâce aux réseaux de neurones convolutifs, qui ont permis d'atteindre des performances quasi-humaines dans des tâches comme la détection d'objets, la reconnaissance faciale ou la segmentation d'image (Szeliski, 2022).

d) Traitement automatique du langage naturel (TALN / NLP)

Le traitement automatique du langage naturel (Natural Language Processing ou NLP) regroupe un ensemble de techniques et d'algorithmes permettant à une machine de comprendre, interpréter, générer et répondre à des langages humains, qu'ils soient écrits ou oraux.

Cela inclut des tâches telles que la traduction automatique, la reconnaissance vocale, l'analyse de sentiments, la génération de texte ou encore la compréhension de questions en langage naturel. Le NLP utilise souvent des modèles statistiques, des réseaux de neurones récurrents (RNN), ou plus récemment des architectures basées sur les transformers comme BERT ou GPT (Jurafsky & Martin, 2023).

e) Robots intelligents

Les robots intelligents sont des systèmes physiques autonomes capables d'interagir avec leur environnement en utilisant des capteurs, des actionneurs et des algorithmes d'intelligence artificielle. Contrairement aux robots traditionnels, programmés pour exécuter des tâches fixes, les robots intelligents peuvent percevoir leur environnement, planifier leurs actions, apprendre de leurs expériences et s'adapter à des situations imprévues.

Ils intègrent souvent des technologies combinées telles que le Machine Learning, la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel et la planification robotique, ce qui leur confère une certaine autonomie décisionnelle (Siciliano & Khatib, 2016).

Tableau II : Principaux domaines de l'intelligence artificielle et leurs applications industrielles.

Domaine	Fonction principale	Exemple en industrie
Machine Learning	Apprendre à partir des données	Prédiction des pannes
Deep Learning	Apprentissage avec réseaux profonds	Détection d'anomalies visuelles
Vision par ordinateur	Interprétation d'images/vidéos	Contrôle qualité visuel
Traitement du langage naturel	Compréhension du langage humain	Interface vocale opérateur
Robots intelligents	Action autonome dans le monde réel	Robot logistique autonome en atelier

Source : Réalisé par nous-mêmes

2.3. Technologies et outils associés à l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle ne peut pas être envisagée en l'absence d'un certain nombre de technologies, y compris des langages de programmation et des bibliothèques logicielles, et d'environnements de développement interactifs. Cette section discute des outils que l'on utilise quotidiennement dans la mise en œuvre de solutions d'IA, qu'elles soient industrielles, scientifiques ou liées à la commercialisation.

2.3.1. Langages de programmation utilisés en IA

a) Python

Python est aujourd'hui le langage de programmation le plus utilisé dans le domaine de l'intelligence artificielle. Sa syntaxe simple et expressive, combinée à une communauté très active et à une riche écosystème de bibliothèques scientifiques, en fait le choix idéal pour le développement de projets en apprentissage automatique, deep learning et traitement de données (Lutz, 2021).

De nombreux frameworks majeurs comme *TensorFlow*, *PyTorch*, *Scikit-learn* et *Keras* sont conçus pour fonctionner nativement avec Python, ce qui facilite l'implémentation de modèles complexes.

b) R

Le langage R, bien qu'il soit historiquement plus orienté vers les statistiques et l'analyse exploratoire des données, est également largement utilisé en intelligence artificielle, notamment pour la modélisation prédictive, l'exploration de données (*data mining*) et l'analyse statistique avancée (Kabacoff, 2022). Il propose de nombreuses bibliothèques spécifiques telles que *caret*, *randomForest* ou *kerasR*, permettant d'appliquer des techniques d'IA dans un environnement statistique robuste.

2.3.2. Bibliothèques et frameworks IA

a) TensorFlow

Développé par Google, TensorFlow est un framework open-source largement adopté pour la création et l'entraînement de modèles d'apprentissage profond. Grâce à sa gestion optimisée des calculs mathématiques sur CPU/GPU/TPU, il est particulièrement adapté aux réseaux de neurones complexes et aux grands ensembles de données (Abadi et al., 2016).

TensorFlow propose deux modes principaux :

- **TensorFlow Core** : pour un contrôle granulaire sur les opérations.
- **TensorFlow High-Level APIs** : comme Keras, pour une utilisation simplifiée.

b) PyTorch

Conçu par Facebook (Meta), PyTorch est un framework populaire dans le monde de la recherche en intelligence artificielle. Il se distingue par son interface dynamique (*define-by-run*), ce qui facilite la débogage et la flexibilité lors de la construction de modèles (Paszke et al., 2019). Il est très utilisé dans les laboratoires de recherche et les publications académiques liées au deep learning.

c) Scikit-learn

Scikit-learn est une bibliothèque Python largement utilisée pour l'apprentissage automatique classique. Elle propose une large gamme d'algorithmes pour la classification, la régression,

le clustering, la réduction de dimensionnalité, ainsi que des outils pour l'évaluation et la sélection de modèles (Pedregosa et al., 2011).

Facile à utiliser et bien documentée, Scikit-learn est idéale pour les projets non basés sur le deep learning mais nécessitant une analyse prédictive puissante.

d) Keras

Keras est une API de haut niveau spécialement conçue pour la création de réseaux de neurones. Elle peut s'exécuter au-dessus de TensorFlow, Theano ou CNTK, mais est désormais intégrée nativement dans TensorFlow 2.x comme interface principale (Chollet, 2015). Grâce à son abstraction élevée, elle permet de concevoir rapidement des modèles d'apprentissage profond, ce qui en fait un excellent outil pédagogique et pratique.

2.3.3. Environnements de développement interactifs

a) Jupyter Notebook

Jupyter Notebook est un environnement de développement interactif open-source très populaire dans la communauté data science et IA. Il permet d'écrire et d'exécuter du code (notamment Python et R) directement dans un navigateur web, tout en intégrant des visualisations, des commentaires en Markdown et des résultats exécutables (Kluyver et al., 2016).

Il est couramment utilisé pour :

- L'exploration interactive des données
- La documentation vivante de modèles
- Le partage collaboratif de résultats techniques

b) Google Colab

Google Colaboratory (ou Google Colab) est une plateforme cloud développée par Google qui permet d'exécuter des notebooks Jupyter gratuitement, avec une prise en charge native des GPU et TPU. Cela en fait un outil puissant et accessible pour entraîner des modèles de deep learning sans infrastructure locale coûteuse (Bisong, 2019).

Les avantages incluent :

- Accès gratuit à des ressources de calcul avancées

- Intégration avec Google Drive
- Collaboration en temps réel

2.4. Applications industrielles de l'intelligence artificielle

2.4.1. Maintenance prédictive :

La maintenance prédictive consiste à utiliser des données provenant de capteurs embarqués (température, vibration, bruit, pression, etc.) pour anticiper les pannes potentielles des équipements avant qu'elles ne surviennent. Cette approche repose sur des algorithmes d'apprentissage automatique tels que Random Forest, Support Vector Machines (SVM), ou encore des modèles de deep learning entraînés à détecter des anomalies dans les signaux temporels ou spectraux (Wang & Wang, 2021). Plutôt que d'attendre une défaillance ou de planifier des interventions systématiques, cette méthode permet une maintenance ciblée, ce qui réduit les temps d'arrêt non planifiés et optimise les coûts de maintenance.

Ex : Dans une usine automobile, un algorithme de type Random Forest détecte les anomalies de vibration d'un moteur avant qu'un problème majeur n'apparaisse, permettant une intervention ciblée.

2.4.2. Contrôle qualité automatisé

Le contrôle qualité automatisé utilise des technologies telles que la vision par ordinateur, les capteurs haute résolution et des modèles d'apprentissage profond pour inspecter les produits manufacturés avec une précision supérieure à celle de l'œil humain. Ces systèmes peuvent identifier des défauts microscopiques, mesurer des dimensions critiques ou vérifier l'assemblage final en temps réel (Zhang, 2022).

Des architectures comme YOLOv8 , Faster R-CNN ou U-Net sont fréquemment utilisées pour la détection, la segmentation et la classification d'images industrielles.

Ex : Un système de vision basé sur YOLOv8 identifie les microfissures sur des pièces métalliques en sortie d'usinage, évitant ainsi leur expédition vers le client.

2.4.3. Optimisation de la chaîne de production

L'optimisation de la chaîne de production repose sur l'analyse des flux de données provenant des machines, des stocks intermédiaires (work in progress) et des ordres de fabrication. Des algorithmes d'intelligence artificielle, notamment ceux du reinforcement learning ou de

l'optimisation combinatoire, sont utilisés pour proposer des séquences de production optimales, minimiser les temps morts et réduire les gaspillages (Kim & Park, 2023).

Ces outils permettent également de simuler différents scénarios de production afin de choisir la configuration la plus efficace en termes de ressources, de coûts et de délais.

Ex : Un algorithme de renforcement learning ajuste en temps réel l'ordonnancement de la chaîne de montage pour minimiser les changements d'outillage et maximiser le rendement.

2.4.4. Robots collaboratifs (Cobots)

Les robots collaboratifs (cobots) sont conçus pour travailler aux côtés des opérateurs humains dans un espace partagé, sans nécessiter de barrières physiques. Grâce à l'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle, ces robots peuvent s'adapter à leur environnement, apprendre par imitation, comprendre les gestes humains et coopérer de manière fluide avec les travailleurs (Krüger, Lien & Verl, 2009).

Ils sont souvent dotés de capteurs tactiles, de caméras et de modèles d'interaction homme-machine avancés.

Ex : Dans une usine électronique, un cobot manipule des composants fragiles pendant que l'opérateur effectue les vérifications visuelles sur la même ligne.

2.4.5. Prédiction de la demande et gestion des stocks

La prévision de la demande et la gestion intelligente des stocks reposent sur des modèles d'analyse prédictive alimentés par des données historiques, des tendances saisonnières, des données de marché et des indicateurs externes (météo, événements, etc.). Ces modèles, souvent basés sur des réseaux de neurones récurrents (RNN), des LSTM ou des modèles statistiques avancés, permettent d'anticiper les fluctuations de la demande et d'ajuster les niveaux de stock en conséquence (Chopra & Meindl, 2021).

Cette approche limite les ruptures d'approvisionnement, réduit les stocks excédentaires et améliore la réactivité de la chaîne logistique.

Ex : Un algorithme de réseau neuronal récurrent (RNN) prédit la demande hebdomadaire de pièces détachées, permettant d'optimiser les commandes fournisseurs et d'éviter les ruptures.

2.5. Avantages et limites de l'intelligence artificielle dans l'industrie

L'intelligence artificielle offre de nombreuses nouvelles opportunités dans le monde industriel, notamment en matière d'automatisation, de productivité et de qualité. Malheureusement, l'adoption de l'intelligence artificielle soulève plusieurs enjeux—techniques, économiques et humains—qui doivent être abordés. Dans cette section, nous examinons les principaux avantages de l'intelligence artificielle pour l'industrie et ses limites actuelles.

2.5.1. Avantages de l'IA dans l'industrie

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les processus industriels génère des bénéfices significatifs à travers plusieurs dimensions clés : productivité, qualité, coûts et prise de décision. Ces avantages transforment progressivement les modèles d'organisation traditionnels en systèmes plus réactifs, flexibles et efficaces.

- **Gain de productivité**

L'IA permet d'automatiser des tâches répétitives, de surveiller en temps réel l'état des équipements et d'optimiser les flux logistiques et de production. En détectant les inefficacités cachées et en proposant des ajustements dynamiques, elle contribue à une augmentation substantielle de la productivité globale (Kusiak, 2022).

- **Amélioration de la qualité**

Les systèmes d'inspection visuelle basés sur l'IA, notamment ceux utilisant la vision par ordinateur et le deep learning, surpassent souvent l'efficacité de l'inspection humaine. Capables de détecter des défauts microscopiques invisibles à l'œil nu, ces outils garantissent un niveau de qualité constant et fiable (Zhang, 2022).

Des architectures comme YOLO, Faster R-CNN ou encore U-Net sont couramment utilisées pour identifier des anomalies dans les produits finis, ce qui réduit considérablement le taux de rebus ou de retouches nécessaires.

- **Réduction des coûts**

L'utilisation de l'IA permet de minimiser les dépenses liées aux arrêts imprévus, à la maintenance excessive, à la consommation énergétique ou au gaspillage de matière première. Des modèles prédictifs peuvent anticiper les pannes d'équipements (maintenance

prédictive), tandis que des outils d'analyse énergétique optimisent la consommation électrique en fonction de la charge de travail (Wang & Wang, 2021).

De plus, grâce à la gestion intelligente des stocks et à la planification automatisée, les entreprises évitent les sure-stocks inutiles tout en maintenant un haut niveau de service.

- **Meilleure prise de décision**

Les outils d'analyse prédictive et de data mining aident les gestionnaires et les ingénieurs à prendre des décisions éclairées en temps réel. En croisant des données historiques, des indicateurs en temps réel et des scénarios simulés, l'IA réduit les incertitudes liées aux fluctuations de la demande, aux pannes de machines ou aux variations de qualité (Chopra & Meindl, 2021).

2.5.2. Limites de l'IA dans l'industrie

Malgré ses nombreux avantages, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les processus industriels présente également des défis et des limites qui peuvent freiner son adoption ou réduire son efficacité si elles ne sont pas correctement gérées. Ces obstacles se situent à différents niveaux : technique, organisationnel, économique et éthique.

- **Coûts de mise en œuvre**

La mise en place de solutions d'intelligence artificielle peut impliquer des investissements importants, notamment en matière de matériel informatique, de développement ou d'intégration logicielle. Ces coûts dépendent largement du type de technologie choisi ainsi que des infrastructures nécessaires au bon fonctionnement des systèmes (Schmidt & Möhring, 2020).

- **Dépendance aux données**

Le fonctionnement des modèles d'IA repose sur l'utilisation de jeux de données volumineux, fiables et bien structurés. En cas de défaut de qualité ou de mauvaise organisation des données, les résultats produits peuvent être inexacts ou manquer de sensibilité, ce qui réduit leur pertinence opérationnelle (Chen, Mao, & Liu, 2019).

Dans le contexte industriel, cela pose plusieurs problèmes :

- Les données historiques peuvent être incomplètes ou mal structurées.
- La collecte de nouvelles données peut nécessiter l'installation de capteurs ou de systèmes d'acquisition coûteux.
- Des biais dans les données peuvent conduire à des décisions erronées ou à une mauvaise généralisation des modèles.

Un modèle mal entraîné risque alors de générer des prédictions inexactes ou insensibles aux variations critiques du processus de production.

- **Complexité technique**

La conception, l'entraînement et la maintenance des systèmes d'intelligence artificielle requièrent des compétences techniques avancées, notamment en algorithmie, en traitement de données et en apprentissage automatique. Cette exigence en expertise constitue un frein important pour certaines entreprises industrielles ne disposant pas de ressources spécialisées (Russell & Norvig, 2020).

- **Problèmes éthiques et humains**

L'utilisation croissante de l'IA dans le secteur industriel soulève des interrogations quant à la place des travailleurs humains, la transparence des décisions algorithmiques et la protection des données stratégiques. Ces enjeux appellent une prise en compte accrue de la responsabilité éthique dans le déploiement de ces technologies (Jobin, Ienca, & Vayena, 2019).

En conclusion, l'intelligence artificielle représente une force motrice majeure de transformation dans le paysage industriel actuel. Elle offre un potentiel considérable pour améliorer la productivité, la qualité, l'efficacité et la prise de décision. Des applications telles que la maintenance prédictive, le contrôle qualité automatisé, l'optimisation de la chaîne de production, la robotique collaborative et la prédiction de la demande transforment les opérations et ouvrent de nouvelles perspectives.

Cependant, l'adoption de l'IA dans l'industrie n'est pas sans défis. Les coûts de mise en œuvre, la dépendance à la qualité des données, la complexité technique et les considérations éthiques et humaines sont des facteurs importants qui doivent être soigneusement pris en compte. Pour exploiter pleinement le potentiel de l'IA, les entreprises doivent investir dans

les infrastructures, les compétences et les stratégies appropriées, tout en abordant de manière proactive les implications éthiques et sociales de cette technologie.

En naviguant avec succès à travers ces opportunités et ces défis, l'industrie peut libérer la puissance de l'IA pour créer un avenir plus efficace, durable et innovant.

Section 3 : Généralité sur la gestion de production

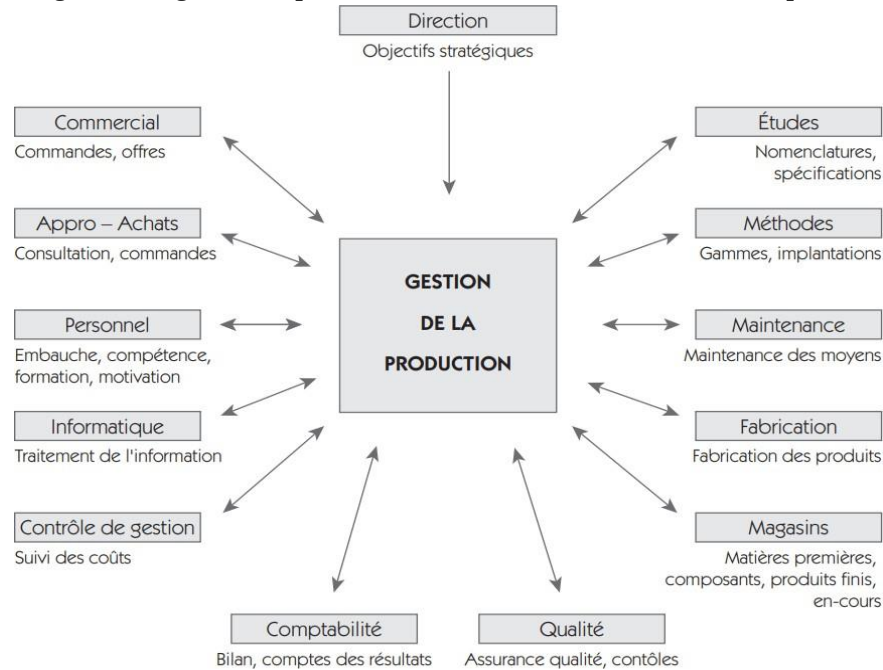
La gestion de la production est un élément essentiel de toute entreprise qui fabrique des biens ou fournit des services. Cette section offre une vue d'ensemble des concepts et des principes fondamentaux de la gestion de la production. Nous commencerons par définir la gestion des opérations de production et son rôle crucial dans l'entreprise. Ensuite, nous explorerons les principaux objectifs de la gestion de la production, notamment l'optimisation des ressources, la réduction des coûts, l'amélioration de la qualité et le respect des délais. Nous examinerons également les différents types de systèmes de production, des projets uniques à la production de masse continue, ainsi que les fonctions clés impliquées dans la gestion de la production, telles que la planification, l'ordonnancement, le lancement et le suivi. De plus, nous analyserons les flux de production, les types d'ateliers et les indicateurs de performance utilisés pour évaluer l'efficacité des opérations de production. Enfin, nous passerons en revue les principaux outils et techniques utilisés dans la gestion de la production, notamment les diagrammes de Gantt, la planification des besoins en composants (MRP), le Kanban et le Juste-à-temps (JAT).

3.1. Définition de la gestion des opérations de production

3.1.1. Notion de production

La production peut être définie comme le processus de transformation d'intrants (matières premières, informations, main-d'œuvre, capital) en extrants (biens ou services) ayant une valeur ajoutée pour les clients. Elle englobe un ensemble d'activités coordonnées visant à créer de l'utilité. (Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. 2016)

Figure 1 : la gestion de production et les autres fonctions de l'entreprise.



Source: (staff.univ-batna2.dz).

3.1.2. Rôle de la gestion des opérations dans l'entreprise

La gestion des opérations de production représente un levier stratégique essentiel pour améliorer la compétitivité des entreprises industrielles. Elle vise à optimiser l'utilisation des ressources, à réduire les coûts et à garantir la qualité des produits tout en respectant les délais. Selon Chase, Jacobs et Aquilano (2006), une gestion efficace des opérations permet non seulement de répondre aux attentes du marché, mais aussi de créer un avantage concurrentiel durable. De leur côté, Hayes, Wheelwright et Clark (2005) soulignent que la performance industrielle repose sur la capacité à aligner les décisions de production avec la stratégie globale de l'entreprise. Ainsi, une maîtrise rigoureuse des processus de production constitue un facteur clé de succès dans un environnement économique de plus en plus compétitif.

3.2. Objectifs de la gestion de production

La gestion de production vise à optimiser l'ensemble des activités de transformation pour atteindre plusieurs objectifs fondamentaux :

a) Optimisation des ressources

Il s'agit d'utiliser efficacement les ressources disponibles (humaines, matérielles, financières, informationnelles) pour maximiser la productivité et minimiser les gaspillages. Cela inclut

l'optimisation de l'utilisation des équipements, la gestion des stocks et l'amélioration de l'efficacité de la main-d'œuvre. (Nahmias, S., & Olsen, T. L. 2015)

b) Réduction des coûts

La minimisation des coûts de production est un objectif constant. Cela passe par l'amélioration de l'efficacité des processus, la réduction des déchets, l'optimisation des achats et la maîtrise des coûts de main-d'œuvre. (Porter, 1985).

c) Amélioration de la qualité

Assurer la conformité des produits aux spécifications et aux attentes des clients est crucial. La gestion de la qualité implique la mise en place de systèmes et de procédures pour prévenir les défauts, détecter les anomalies et améliorer continuellement les produits et les processus. (Garvin, 1988).

d) Respect des délais

Répondre aux exigences des clients en termes de délais de livraison est essentiel pour la satisfaction et la fidélisation. La gestion de production doit planifier et coordonner les activités pour minimiser les temps de cycle et respecter les échéances. (Goldratt, 1990)

3.3. Types de systèmes de production

Les systèmes de production peuvent être classés en fonction du volume de production, de la variété des produits et du flux des opérations :

3.3.1. Production unitaire

La production unitaire consiste à fabriquer des produits uniques ou en très petites séries, souvent personnalisés selon les besoins du client. Ce type de production est courant dans les industries artisanales, les prototypes ou les machines spéciales. (Slack et al., 2022)

3.3.2. Production en série

La production en série implique la réalisation de plusieurs exemplaires d'un même produit. On distingue généralement trois sous-catégories : (Krajewski et al., 2022)

a) Petite série :

- Fabrication limitée, souvent entre 10 et 10 000 pièces.
- Adaptée pour des produits semi-personnalisés ou des tests de marché.

b) Moyenne série :

- Volume intermédiaire, combinant flexibilité et standardisation.
- Utilisée pour des produits à demande régulière mais non massive.

c) Grande série :

- Production massive de produits identiques.
- Organisation linéaire et automatisée pour garantir l'efficacité.

3.3.3. Production en continu

La production en continu est un système où les processus fonctionnent sans interruption pendant de longues périodes, souvent 24h/24. Elle est utilisée pour des biens standardisés à forte demande. (Groover, 2021).

3.3.4. Production à la commande / sur stock

- **Production à la commande (Make-to-Order - MTO) :** Les produits sont fabriqués uniquement après réception d'une commande client.
 - Le produit est lancé en fabrication seulement après réception de la commande client.
 - Permet une forte personnalisation, mais entraîne des délais plus longs.
- **Production sur stock (Make-to-Stock - MTS) :** Les produits sont fabriqués en prévision de la demande et stockés avant la vente.
 - Les produits sont fabriqués en avance, en prévision de la demande.
 - Réduit les délais de livraison, mais augmente les coûts de stockage. (Neotel Technology, 2023).

3.4. Fonctions principales de la gestion de production

La gestion de production s'articule autour de plusieurs fonctions essentielles :

a) Planification

Déterminer les objectifs de production, les ressources nécessaires (main-d'œuvre, matières premières, équipements), les quantités à produire et les délais. Elle comprend la planification à long terme (stratégique), à moyen terme (tactique) et à court terme (opérationnelle). (Vollmann, Berry, Whybark, & Jacobs, 2005).

b) Ordonnancement

Établir le calendrier détaillé des opérations de production, en attribuant les tâches aux ressources disponibles et en définissant les séquences de travail. L'objectif est d'optimiser l'utilisation des ressources et de respecter les délais. (Baker, 2009)

c) Lancement

Mettre en œuvre le plan de production en émettant les ordres de fabrication, en distribuant les matières premières et en mobilisant les ressources nécessaires. (Dilworth & Jewell, 2012)

d) Suivi et contrôle

Surveiller l'avancement de la production, comparer les réalisations aux objectifs, identifier les écarts et prendre des mesures correctives pour assurer l'atteinte des résultats attendus en termes de quantité, de qualité et de délai. (Deming, 2000).

3.5. Les flux de production

La gestion des opérations s'intéresse à la circulation des biens et des informations au sein du système de production et de la chaîne d'approvisionnement :

➤ **Flux physiques (matières, produits)**

Le mouvement des matières premières, des composants, des produits en cours de fabrication et des produits finis à travers les différentes étapes du processus de production. (Hopp & Spearman, 2011).

➤ **Flux d'informations (commandes, consignes, retours)**

La circulation des données et des informations nécessaires à la planification, à l'exécution et au contrôle de la production, incluant les commandes clients, les consignes de travail, les informations sur l'état des stocks et les retours d'information sur la performance. (Lee, 2004).

3.6. Types d'ateliers et organisation des flux

L'agencement des équipements et l'organisation des flux de production peuvent prendre différentes formes :

3.6.1. Ateliers en ligne (flux continu)

Les équipements sont disposés selon la séquence des opérations nécessaires à la fabrication du produit. Les flux sont linéaires et continus, adaptés à la production de masse standardisée. (Womack, Jones, & Roos, 1990).

3.6.2. Ateliers par procédé (flux fonctionnel)

Les équipements similaires sont regroupés par fonction ou par type d'opération (ex : atelier d'usinage, atelier de peinture). Les flux sont plus complexes et variables, adaptés à la production diversifiée en petites séries. (Buffa & Dyer, 1992).

3.6.3. Ateliers flexibles

Combinent des éléments des ateliers en ligne et par procédé pour offrir une plus grande flexibilité dans la production de différents types de produits. L'utilisation de cellules de fabrication est fréquente. (Ghods et al., 2022), (Chai et al., 2016).

3.7. Indicateurs de performance en production

Pour évaluer l'efficacité et l'efficience des opérations de production, plusieurs indicateurs clés sont utilisés :

3.7.1. Taux de rendement global (TRG) / Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Mesure le pourcentage de temps de production réellement productif par rapport au temps total disponible. Il prend en compte la disponibilité, la performance et la qualité.

La formule générale est :

« **TRG = Disponibilité × Performance × Qualité** »

- **Disponibilité** : temps réel de production / temps planifié.
- **Performance** : vitesse réelle / vitesse théorique.
- **Qualité** : quantité de pièces conformes / quantité totale produite

Il permet d'évaluer la perte de productivité dans un processus donné et constitue un levier essentiel pour identifier les axes d'amélioration

Ce KPI est particulièrement utile dans les unités industrielles pour optimiser les performances des machines

3.7.2. Taux d'utilisation

Cet indicateur mesure à quel point les ressources (machines, ateliers, personnel) sont utilisées par rapport à leur capacité maximale.

Il sert à évaluer si l'entreprise exploite pleinement ses installations ou si elle dispose d'une capacité excédentaire inutilisée.

Taux d'utilisation = Temps de fonctionnement réel / Temps maximum disponible

Un faible taux peut indiquer des problèmes de maintenance, de planification ou de demande insuffisante. C'est un indicateur stratégique pour ajuster les investissements matériels ou humains.

3.7.3. Productivité

La productivité exprime la quantité de biens ou services produits par unité de ressource utilisée (travail, capital, énergie, etc.). Elle est souvent mesurée comme le ratio entre la production obtenue et les ressources consommées.

Productivité du travail = Quantité produite / Heures travaillées.

Ex : productivité par heure de travail, productivité par machine.

Améliorer la productivité signifie produire plus avec les mêmes moyens, ou produire autant avec moins de ressources. C'est un objectif central en gestion de production pour rester compétitif

3.7.4. Taux de rebut / taux de conformité

Ces deux indicateurs mesurent la qualité du processus de fabrication :

- **Taux de rebut :** Pourcentage de produits non conformes ou défectueux par rapport à la production totale. (Nombre de pièces défectueuses / Nombre total de pièces produites).
- **Taux de conformité :** Pourcentage de produits conformes aux spécifications par rapport à la production totale. (Nombre de pièces conformes / Nombre total de pièces produites).

Ils permettent d'évaluer la maîtrise des processus, la fiabilité des équipements et l'impact des défauts sur les coûts et les délais.

Une amélioration continue de ces indicateurs est un pilier du Lean Manufacturing et de la démarche Six Sigma.

3.8. Principaux outils de gestion de production

Différents outils et méthodes sont utilisés pour planifier, organiser et contrôler les opérations de production :

3.8.1. Gantt (diagramme de planification)

Le diagramme de Gantt est un outil visuel de planification qui permet de représenter graphiquement les différentes tâches d'un projet ou d'un plan de production sur une échelle de temps. Il facilite la gestion des délais, la coordination des équipes et le suivi du calendrier de fabrication.

- **Avantages :**
 - Visualisation claire du planning,
 - Suivi en temps réel de l'avancement,
 - Meilleure communication entre les services.

3.8.2. MRP (planification des besoins en composants) / Material Requirements Planning

Le MRP est un système informatique de gestion de la production qui permet de calculer les besoins en matières premières et en composants nécessaires à la fabrication d'un produit fini, en fonction du programme de production et de la nomenclature du produit. (Neotel Technology, 2023).

- **Fonctionnement :**
 - À partir de la demande client ou du plan de production,
 - Le système calcule les quantités nécessaires de chaque composant,
 - Et définit les dates de livraison ou d'utilisation.

3.8.3. Kanban

Le Kanban est un système de gestion visuelle des flux de production, originaire du Japon et largement inspiré des méthodes Toyota. Il repose sur l'utilisation de cartes ou signaux indiquant le besoin de produire ou de réapprovisionner un poste de travail. (Monden, 2012).

- **Principe :**
 - La production est déclenchée uniquement si le poste aval a besoin de matière.
 - Permet une production tirée, contrairement au MRP qui est souvent une production poussée. (Kanbanize, 2023).

3.8.5. Juste-à-temps (JAT) / Just-in-Time (JIT)

- **Déf 1 :** Le Juste-à-Temps, ou Just-in-Time (JIT), est une méthode de gestion de production qui consiste à produire ou recevoir les produits exactement au moment où ils sont nécessaires, ni avant, ni après. (Liker, 2004). Cette approche vise à :
 - Réduire les stocks,
 - Minimiser les coûts de stockage,

- Améliorer la réactivité face aux demandes clients. (Womack, & Jones, 2003).
- **Déf 2 :** Une philosophie de gestion de la production visant à éliminer les gaspillages et à produire uniquement ce qui est nécessaire, quand c'est nécessaire et en quantité nécessaire. (Ohno, 1988).

3.9. Qualité en production

La gestion de la qualité est une dimension essentielle de la gestion des opérations :

a) Assurance qualité (AQ) : Un ensemble d'activités planifiées et systématiques mises en œuvre dans le système qualité afin de donner confiance en ce qu'une entité satisfera aux exigences pour la qualité. Elle est proactive et vise à prévenir les défauts. Elle inclut :

- La mise en place d'un système qualité (**ex** : ISO 9001),
- La formation des équipes,
- Le suivi des processus via des indicateurs,
- L'amélioration continue.

b) Contrôle qualité (CQ) : Les activités et techniques utilisées pour mesurer, comparer avec les normes et agir sur les différences. Il est une approche réactive centrée sur l'inspection et le test des produits finis ou intermédiaires, afin de détecter les non-conformités. Il comprend :

- Les inspections et tests en cours et en fin de production,
- Le tri des lots défectueux,
- La reprise ou le rebut des produits non conformes. (ISO 9000:2015).

Tableau III : Tableau comparatif Assurance qualité vs Contrôle qualité.

Critère	Assurance qualité	Contrôle qualité
Objectif	Éviter les défauts	Détecter les défauts
Approche	Préventive	Réactive
Outils	Processus, audits, amélioration continue	Inspection, mesure, essais
Responsable	Direction, équipe qualité	Service contrôle qualité

(Source élaboré par nous-mêmes)

3.9.1. Outils de la qualité (Pareto, Ishikawa, 5M)

a) Diagramme de Pareto : Un outil graphique qui permet d'identifier les causes les plus importantes d'un problème en les classant par ordre de fréquence. (80 % des problèmes proviennent de 20 % des causes. Il permet d'identifier les causes prioritaires de défauts pour concentrer les efforts d'amélioration sur les éléments les plus impactants).

b) Diagramme d'Ishikawa (ou diagramme de causes à effets, diagramme en arêtes de poisson) : Un outil visuel utilisé pour identifier les causes potentielles d'un problème.

c) La méthode des 5M (Main d'œuvre, Matériel, Méthode, Milieu, Matière) : Une technique de brainstorming pour identifier les différentes catégories de causes possibles d'un problème.

- **Matériel** (machines, outils),
- **Main-d'œuvre** (compétences, comportement),
- **Méthodes** (procédures, modes opératoires),
- **Milieu** (environnement, conditions de travail),
- **Mesures** (contrôles, capteurs).

3.10. Impact des nouvelles technologies sur la gestion de production

Les avancées technologiques transforment en profondeur la gestion des opérations :

a) Automatisation

L'utilisation de machines et de systèmes pour effectuer des tâches qui étaient auparavant réalisées par des humains, permettant d'améliorer l'efficacité, la qualité et de réduire les coûts. Elle permet :

- Une augmentation significative de la productivité, grâce à une exécution rapide et précise des tâches répétitives,
- Une meilleure qualité du produit final, avec une réduction des erreurs humaines,
- Une réduction des coûts opérationnels, notamment par la diminution des heures de travail manuel. (<https://www.autodesk.com>).

b) Industrie 4.0

L'intégration des technologies numériques (internet des objets IoT, intelligence artificielle, big data, les jumeaux numériques et cloud computing) dans les processus de production pour créer des usines intelligentes, connectées et flexibles. (Schwab, 2016), (Lasi et al., 2014 ; Liao et al., 2017 ; Xu et al., 2018).

Son impact sur la gestion de production est majeur :

- **Optimisation des processus** : les données en temps réel permettent d'ajuster instantanément les flux de production.
- **Maintenance prédictive** : grâce à l'analyse des données des machines, il devient possible d'anticiper les pannes avant qu'elles ne surviennent.
- **Flexibilité accrue** : les usines connectées peuvent s'adapter rapidement aux variations de la demande ou aux changements de produits. (Wayden, 2023).

c) Systèmes ERP (Enterprise Resource Planning)

Des logiciels intégrés qui gèrent l'ensemble des processus de l'entreprise, y compris la gestion des opérations, la finance, les ressources humaines et la relation client, permettant une meilleure coordination et une vision globale des activités. (O'Leary, 2000).

Ils permettent :

- Une meilleure visibilité sur les stocks, les délais et les besoins en composants.
- Une planification plus efficace grâce à l'intégration des outils MRP (Management Requirements Planning).
- Une prise de décision éclairée grâce à des rapports en temps réel. (Kotz, Pernul & Wrycza, 2021), (Wortmann, & Verdouw, 2018).

En conclusion, la gestion de la production est une fonction complexe et dynamique qui joue un rôle essentiel dans le succès de toute entreprise. En optimisant les ressources, en réduisant les coûts, en améliorant la qualité et en respectant les délais, les entreprises peuvent atteindre leurs objectifs stratégiques et obtenir un avantage concurrentiel. Les outils et les techniques décrits dans cette section fournissent un cadre aux responsables de la production pour planifier, organiser et contrôler efficacement les opérations. De plus, les nouvelles

technologies telles que l'automatisation, l'Industrie 4.0 et les systèmes ERP transforment la gestion de la production, offrant de nouvelles opportunités d'améliorer l'efficacité, la flexibilité et la prise de décision.

Conclusion du chapitre

La littérature examinée dans ce chapitre démontre clairement que l'Intelligence Artificielle joue un rôle central dans la modernisation des opérations de production. Ses applications, telles que l'optimisation des flux, la maintenance prédictive ou la gestion des stocks, apportent des gains significatifs en termes de productivité, de qualité et de réduction des coûts. Cependant, son adoption n'est pas sans défis : la dépendance aux données, les coûts élevés d'implémentation, la complexité technique et les questions éthiques nécessitent une attention particulière. Les recherches futures devront se concentrer sur le développement de solutions plus accessibles et robustes, tout en intégrant les dimensions humaines et sociales de cette transformation. En somme, l'IA offre des opportunités immenses pour l'industrie, mais son succès dépendra de la capacité des entreprises à relever ces défis avec une approche équilibrée et innovante.

Chapitre II :
Cadre Méthodologique et
Présentation de l'organisme d'accueil

Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour étudier l'impact de l'intelligence artificielle (IA) sur la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle. Il décrit les approches choisies pour observer les processus de production, réaliser un diagnostic des pratiques actuelles, et identifier les opportunités d'amélioration grâce à l'IA. L'étude s'appuie sur une observation directe et participante, combinée à des entretiens informels et une analyse documentaire. En parallèle, ce chapitre introduit l'entreprise ETRAG et sa filiale ATC, en détaillant leur historique, leurs activités et leur organisation. Ces éléments fournissent le contexte nécessaire pour comprendre les défis et les potentialités liés à l'intégration de l'IA dans leur environnement industriel.

Section 1 : Cadre méthodologique

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour mener l'étude de cas dans le cadre de ce mémoire, intitulé *L'apport de l'intelligence artificielle dans la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle*.

L'objectif principal est de comprendre les processus de production de l'entreprise dans laquelle j'ai effectué mon stage, de réaliser un diagnostic des pratiques actuelles, et d'identifier les points d'amélioration où l'introduction de l'intelligence artificielle pourrait potentiellement optimiser la gestion des opérations.

La méthodologie repose sur une approche observationnelle combinée à une analyse de diagnostic des processus existants.

1.1. Méthodologie de recherche

1.1.1. Définition : désigne l'ensemble des démarches, outils et processus utilisés pour conduire une étude ou une recherche scientifique de manière structurée et rigoureuse. Elle englobe le choix des méthodes de collecte de données, d'analyse et de présentation des résultats. Son but est d'assurer la validité et la fiabilité des conclusions tirées à partir des données collectées. Cela inclut le choix de la méthodologie (quantitative, qualitative, ou mixte), les techniques de collecte (enquêtes, interviews, observation, etc.), et les méthodes d'analyse des données (statistiques, analyse de contenu, etc.). (Bardin, L. (2013). *L'analyse de contenu*. Presses Universitaires de France. (Sarantakos, 2013).

1.1.2. Objectifs de la Méthodologie

Les objectifs de cette méthodologie sont :

1. **Observer les processus de production** dans l'entreprise industrielle, en analysant les différentes étapes de production, les outils utilisés, et l'organisation du travail.
2. **Réaliser un diagnostic complet** de l'entreprise, en identifiant les forces, faiblesses, opportunités et menaces relatives aux opérations de production.
3. **Proposer des solutions basées sur l'intelligence artificielle**, en fonction des lacunes identifiées et des améliorations potentielles pour l'efficacité et la rentabilité de la production.

1.1.3. Choix de la Méthodologie : Observation d'un situ et Diagnostic

Dans le cadre de cette étude, la méthodologie choisie se base sur deux axes principaux : **l'observation** des processus de production et **le diagnostic** de l'entreprise.

1.1.3.1. L'Observation des Processus de Production

L'observation a été la méthode principale utilisée pour recueillir des données sur le terrain. Elle a permis de comprendre en profondeur le fonctionnement quotidien de l'entreprise, et de visualiser les activités et interactions qui se déroulent sur le site de production. (*Spradley, J. P. 1980. Et Kawulich, B. B. 2005*).

L'observation a été réalisée selon deux types de modalités :

- a) **Observation directe** : Observation des employés en action, des machines et des systèmes utilisés au sein de l'atelier de production.
- b) **Observation participante** : En tant que stagiaire, j'ai été impliqué dans certaines tâches de production, ce qui m'a permis d'interagir avec les équipes, d'observer les processus de plus près et de mieux comprendre les défis rencontrés dans la gestion des opérations.

Pendant l'observation, plusieurs aspects ont été scrutés :

- a) L'efficacité des opérations de production : gestion du temps, des ressources et des machines.
- b) La gestion des stocks et des matières premières.

- c) Les pratiques de maintenance des équipements.
- d) Les interactions entre les différentes équipes de production et de gestion.

1.1.3.2. Le Diagnostic de l'Entreprise

Le diagnostic réalisé repose sur l'analyse des processus internes et des performances de l'entreprise. Il a été effectué à partir de l'observation combinée à des interviews informelles avec les responsables et les opérateurs de production. Les objectifs de ce diagnostic étaient :

- a) **Analyser les processus de production existants** : Cela inclut l'identification des étapes de production, des goulots d'étranglement et des inefficacités dans l'utilisation des ressources.
- b) **Evaluer les technologies utilisées** : Bien que l'entreprise ne dispose pas d'intelligence artificielle, j'ai observé les outils manuels et logiciels en place, et évalué leur efficacité.
- c) **Identifier les lacunes et les opportunités d'amélioration** : Par exemple, une gestion manuelle des stocks, des processus de maintenance réactifs, ou des décisions basées sur des intuitions plutôt que des données.

1.1.4. Techniques de Collecte des Données

Pour mener à bien cette recherche, plusieurs techniques ont été employées :

- a) **Observation sur le terrain** : Des sessions d'observation ont eu lieu pendant une période de plusieurs semaines, me permettant d'accumuler des données qualitatives sur les activités de production.
- b) **Interviews informelles** : Des discussions ont eu lieu avec les responsables de la production, les opérateurs, et les gestionnaires de maintenance pour recueillir des informations complémentaires sur les défis de gestion de production et les systèmes en place.
- c) **Analyse documentaire** : Les rapports internes de l'entreprise, ainsi que les documents relatifs aux processus de production et de gestion, ont été examinés pour compléter les observations et pour obtenir des données quantitatives, telles que les taux de rendement des équipements.

1.1.5. Limites de la Méthodologie

Il est important de souligner certaines limites de cette méthodologie :

- a) **Absence de données quantitatives précises** : L'entreprise ne disposait pas de systèmes automatisés permettant de collecter des données précises sur la production, ce qui a limité l'analyse en termes de chiffres exacts pour certaines dimensions du diagnostic.
- b) **Biais lié à l'observation** : L'observation peut comporter des biais subjectifs, bien que j'aie cherché à minimiser cela en diversifiant les sources d'informations (interviews, analyse documentaire).
- c) **Problème de représentativité** : L'entreprise étudiée n'utilise pas l'intelligence artificielle, ce qui peut limiter la portée de l'étude en termes de comparabilité avec d'autres entreprises industrielles plus avancées technologiquement.

1.1.6. Analyse des Résultats et Proposition de Solutions

Les données collectées au cours de l'observation et du diagnostic ont été analysées de manière qualitative pour identifier les principales forces et faiblesses des opérations de production. Cette analyse a servi de base pour proposer des solutions d'amélioration, dont l'introduction de l'intelligence artificielle pour :

- a) **Optimisation de la planification de la production** grâce à des systèmes de prévision basés sur l'IA.
- b) **Maintenance prédictive** en utilisant des algorithmes de machine learning pour prévoir les pannes des équipements avant qu'elles ne se produisent.
- c) **Automatisation des processus** pour réduire les erreurs humaines et améliorer l'efficacité des opérations.

1.1.7 Conclusion

Cette méthodologie basée sur l'observation et le diagnostic de l'entreprise a permis de recueillir des informations précieuses sur les processus de production actuels. Les données ainsi collectées fourniront des bases solides pour l'analyse des impacts potentiels de l'introduction de l'intelligence artificielle dans la gestion des opérations de production.

Section 02 : Présentation de l'entreprise ETRAG

2.1. Historique

La construction du Complexe Industriel Moteurs Tracteurs par abréviation « CIMOTRA » a débuté en 1970. Le premier tracteur en est sorti le 02 Février 1974 avec la collaboration de deux grandes firmes allemandes : la DIAG comme constructeur et KHD comme donneur de licence DEUTZ, dans le cadre de la politique de développement industriel en Algérie ainsi que la couverture du marché national en moteurs et tracteurs agricoles.

La restructuration organique intervenue en 1982 a donné naissance à 11 entreprises nationales.

Parmi lesquelles l'Entreprise Publique Economique de Production du Machinisme Agricole par abréviation « l'EPE/PMA » à laquelle était rattaché le Complexe industriel Moteurs Tracteurs sous une nouvelle appellation « CMT ». En 1997 CMT est devenu une entreprise indépendante et autonome avec le statut d'Entreprise Publique Economique, Société par Action par abréviation « EPE/Spa », dont l'objectif est la fabrication des moteurs et des tracteurs agricoles.

En 2009 l'EPE CMT Spa a fait l'objet d'une scission pour donner naissance à deux sociétés distinctes : L'Entreprise Tracteurs Agricoles « EPE ETRAG Spa » dont l'objectif est la fabrication et le développement des tracteurs agricoles, et l'Entreprise Moteurs « EPE EMO Spa » dont l'objectif est la fabrication et le développement des moteurs.

2.2. Fiche de présentation de l'entreprise et ses métiers de base

Dénomination : Entreprise Publique Economique des Tracteurs Agricoles Société par Actions.

Abréviation : EPE ETRAG Spa.

Date de création : 29 juin 2009 suite à la scission de l'EPE CMT Spa.

Activité : fabrication et développement des tracteurs agricoles.

Adresse : DZ – 25100 Constantine BP 74 Khroub Centre.

Date de sortie du premier tracteur : 02 février 1974.

Superficie : 33 ha dont 6,2 ha couverts.

Capacité actuelle de production : 2000 tracteur/ans.

Chiffres d'affaires : 4 798MDAen 2015.

Effectif : 1200 employés.

Forme juridique : Société par actions capacité actuelle de production : 2000tracteur/ans.

No RC : 09B0068395-25/00 chiffres d'affaires : 4 798MDAen 2015.

Capital social : 4 456 080 000 DA Effectif : 1200 employés.

Siège Social : Oued Hamimime El Khroub Constantine.

Tél : (031) 95 54 13/15.

Fax : (031) 95 52 08

E-mail: info@etrag.dz; Web: www.etrag.dz.

Membre de :

- CCI RHumel : Chambre de commerce et d'Industrie de Constantine.
- BASTP : Bourse Algérienne de Sous-Traitance et Partenariat.
- AACIA : Association des Auditeurs Consultants Internes Algériens.
- UNEP : Union Nationale Des Entrepreneurs Publics.
- UPIAM : Union Professionnelle de l'Industrie Automobile et Mécanique.
- CCI AF : Chambre de Commerce et d'Industrie Algéro-Française.

2.3. PARTENARIAT

ETRAG 36%  **PMAT 15%**  **AGCO Massey Fergusson 49%**  MASSEY FERGUSON

ETRAG et **PMAT** ont conclu un partenariat industriel et commercial avec **AGCO** leader mondial dans la fabrication du machinisme agricole, par la création en date du 16/08/2012 d'une joint-venture (société commune) dénommée **ALGERIAN TRACTORS COMPANY** « ATC Spa » ayant pour objet la fabrication de tracteurs agricoles de marque « Massey Ferguson »

- ✦ La partie algérienne **51%** dont : [ETRAG](#) **36%** / [PMAT](#) **15%**
- ✦ Le partenaire étranger [AGCO](#) : **49%**

ALGERIAN TRACTORS COMPANY « ATC » est une nouvelle contribution à la mécanisation de l'agriculture algérienne, créée dans l'objectif de la continuité de la production des tracteurs, et dans le contexte de développement à l'ère de la mondialisation de l'économie, où ATC pose déjà un pied de part sa constitution sous forme d'une société mixte en partenariat industriel et commercial avec AGCO, l'un des leader mondiaux en machinisme agricole pour la fabrication d'une gamme variée de tracteurs agricoles de marque Massey Ferguson.

Algerian Tractors Company **ATC Spa** a pour mission, La fabrication des tracteurs agricoles [Massey Ferguson](#) :

- ✦ **MF 425** 2 et 4 RM (55 CH)
- ✦ **MF 415** 2 et 4 RM (45 CH)
- ✦ **MF 440 Xtra** 4 RM (82 CH) DEUTZ
- ✦ **MF 440 Xtra** 4 RM (82 CH) PERKINS
- ✦ **MF 7150** 4 RM (150 CH) ▪ **MF 7180** 4 RM (180 CH)

Le tracteur agricole Massey Ferguson de type **MF 440** fabriqué par la société mixte Algerian Tractors Compagny ATC Spa équipé d'un moteur **DEUTZ 2012** refroidi à eau, fabriqué et fourni par l'EPE EMO.

2.4. Les métiers de base d'ETRAG

ETRAG dispose d'un processus de fabrication de tracteurs agricoles fortement intégré :

- **Activité fonderie**

La fonderie a pour missions la fourniture des besoins en pièces brutes de fonderie (fonte/aluminium) destinées pour les tracteurs agricoles CIRTA et MF(Massey Fergusson) et les moteurs DEUTZ.

- ✦ Production de pièces de 160 g à 225 kg

- ✦ Fabrication de 225 000 pièces/an soit 2000 tonnes : 45 positions pour les tracteurs CIRTÀ et MF et 30 positions pour les moteurs DEUTZ.

Figure 2 : Activité fonderie.



(Source : Site ETRAG)

- **Activité forge**

Les ateliers de forge ont pour mission la production des composants de brut de forge destinés pour les tracteurs agricoles CIRTÀ et MF et les moteurs DEUTZ.

- ✦ Production de pièces de 200 g à 40 kg
- ✦ Fabrication de 135 000 pièces/an : 45 positions pour les tracteurs CIRTÀ et MF et 10 positions pour les moteurs DEUTZ.

Figure 3 : Activité forge.



(Source : site ETRAG).

- **Activité usinage mécanique et traitement thermique**

Les ateliers d'usinage mécanique de précision fabriquent des pièces destinées pour les tracteurs CIRTÀ et MF ainsi que pour les moteurs DEUTZ, de la pièce de rechange ainsi que des prestations de sous-traitance pour les autres clients, en utilisant différentes technologies d'usinage :

- ✦ Fabrication de 1 400 000 pièces/an : 363 positions pour les tracteurs Cirta et MF et 157 positions pour les moteurs DEUTZ.

Figure 4 : Activité usinage mécanique.

(Source : site ETRAG).

- **Activité construction mécanique**

Les ateliers de Construction métallique ont pour mission la réalisation et l'assemblage des pièces finies en tôle, destinées pour le tracteurs agricoles CIRTA et MF et les moteurs DEUTZ, en appliquant différents procédés de soudage, découpe, pliage et estampage.

- ✦ Fabrication de 1 275 000 pièces/an : 335 positions pour les tracteurs Cirta et MF et 150 positions pour les moteurs DEUTZ EVOLUTION DE LA GAMME DES PRODUITS

**Figure 5 : Activité construction mécanique (site ETRAG)**

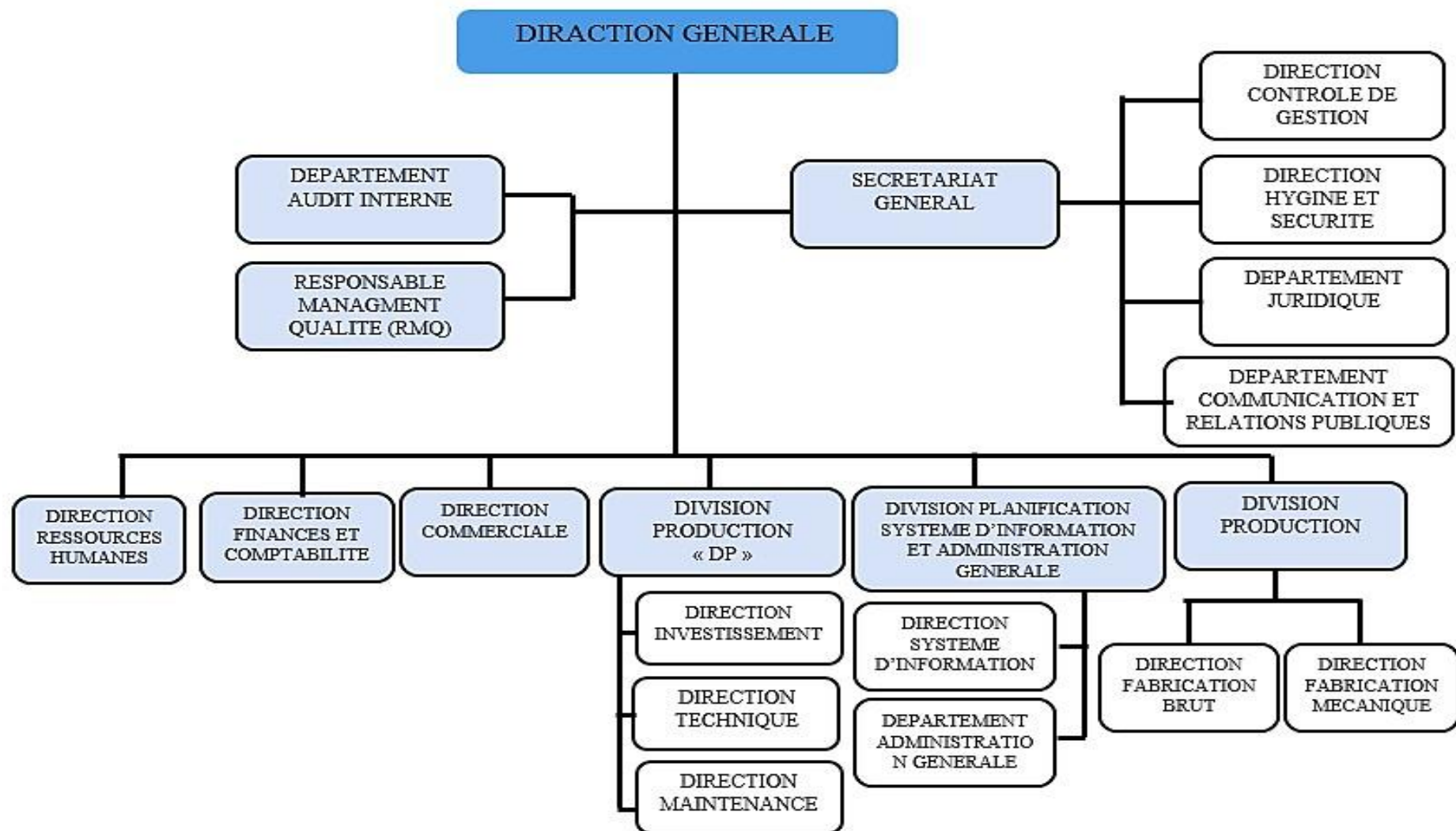
Tableau IV : Différents tracteurs agricoles fabriqués dans l'entreprise.

Tracteurs	Type	Période de Fabrication	Nombre de tracteurs Produits
	C4006	1974-1983	2420
	C6006	1974-2003	52 281
	CT900	1976-1981	205
	CX100	2001-2012	263
	CX3.70	2003-2010	32
	C6807	1998 à ce jour	55 864

(Source : Catalogue des tracteurs ETRAG)

2.5. Organigramme de l'entreprise tractrice agricole

Figure 6 : L'organigramme d'ETRAG.



(Source : Documents ETRAG).

2.6. Présentation des divisions et directions

2.6.1. Direction général

Mission

- L'élaboration de la stratégie de développement de l'entreprise.
- La supervision du fonctionnement des différentes structures de l'entreprise.
- La coordination des activités du staff dirigeant et la préparation et la prise des décisions stratégiques opérationnelles.

Structure

- Le responsable management qualité.
- Département audit interne.

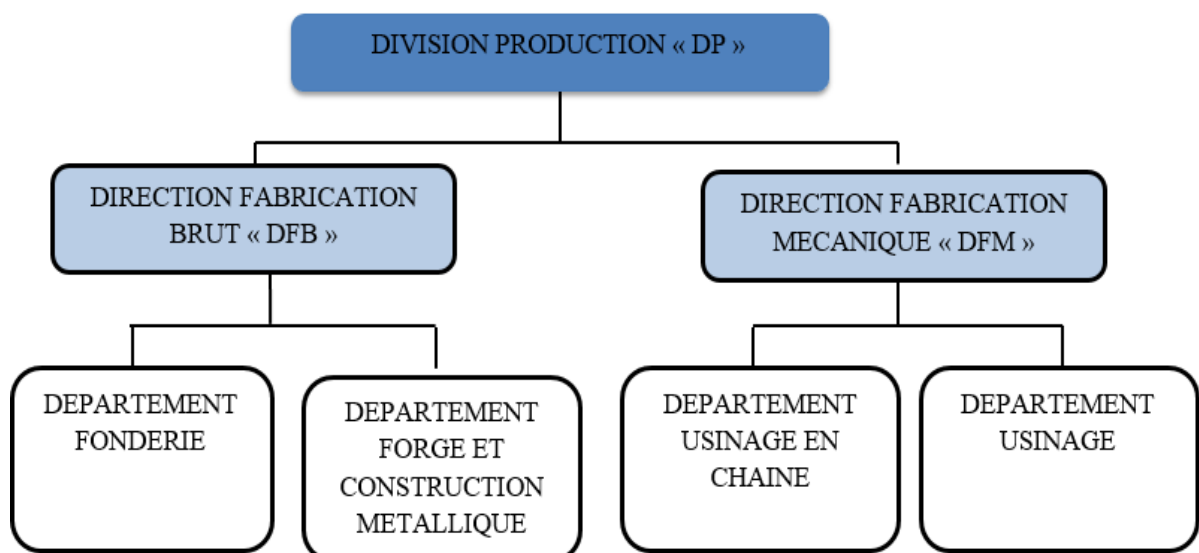
2.6.2. Division de production

C'est la division de base de l'entreprise, Le potentiel industriel d'ETRAG est structuré selon une Spécialisation technologique inter dépendante :

- Direction Fabrication Brut.
- Direction Fabrication Mécanique.

2.6.3. Organigramme de la division de production (DP)

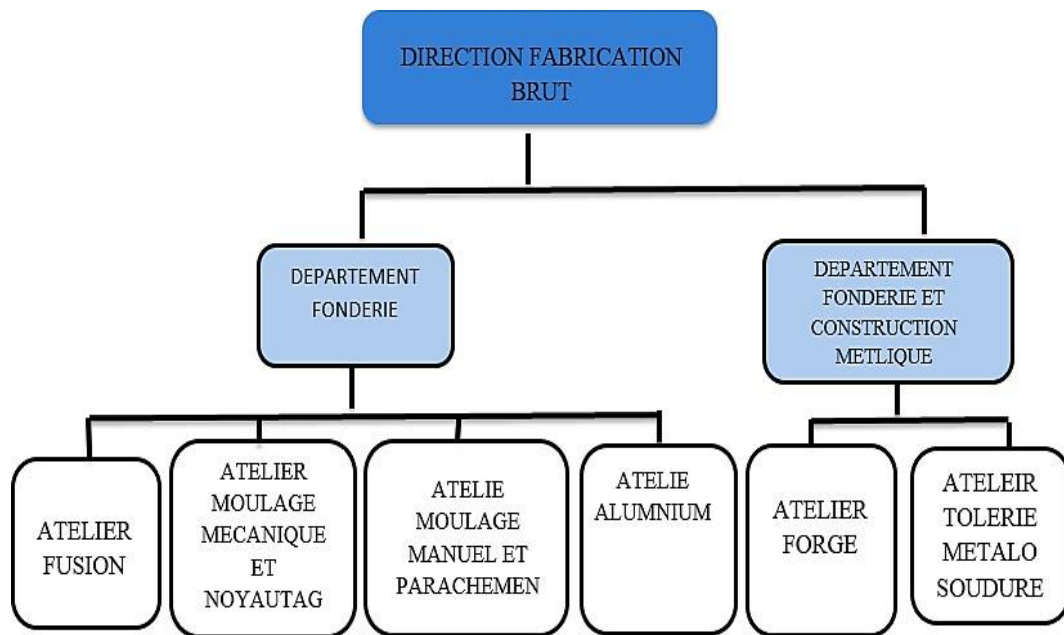
Figure 7 : Organigramme de la division de production (DP).



(Source : Documents ETRAG).

2.6.4. Organigramme de la direction fabrication brut (DFB)

Figure 8 : Organigramme de la direction fabrication brut (DFB)



(Source : Documents ETRAG).

2.6.4.1. Direction fabrication brut

- **Activité principale**

La direction Fabrication brut est chargée de fabriquer des pièces de forge et de tôlerie et d'assurer les besoins des autres processus de fabrication en matière de pièces brutes en fonte et aluminium suivant des exigences techniques, de fonctionnalité et de délais. Réaliser le programme de sous- traitement (commande client, émises par la division commerciale). Elle est composée de deux départements :

2.6.4.2. Département Fonderie

Ce département est spécialisé dans la fabrication des pièces en fonte ou en aluminium pour moteurs, tracteurs, machines-outils et divers. La fonderie consiste à :

- La fabrication manuelle et automatique des moules en sable et charbon dans des châssis métalliques.
- La fabrication de noyaux en sable avec du sable et des liants synthétiques.
- La coulée de la fonte liquide à partir de fours électriques, refroidissement.
- Décochage et l'ébarbage de pièces de fonte grises.

a) Atelier Fusion

- **Activité principale**

C'est le lieu de fabrication de la fonte et sa préparation pour la coulée. Cet atelier a pour objectif : Satisfaire les deux ateliers de production moulage mécanique et moulage à main en matière première (métal liquide) pour la réalisation du programme annuel.

- **Moyen de production et installation :**

L'atelier fusion fonte dispose de 3 fours à induction :

- Un four de maintien à canal capacité 20T en métal liquide d'une puissance de 500KVA ; Température maximale de coulée : 1500 °C.
- Deux (02) fours à induction capacité 3T et 5T d'une puissance respective de 750 KVA et 900 KVA ; température maximale de coulée : 1550°C.

b) Atelier moulage mécanique et noyautage

- **Activité principale**

La production des pièces brutes en fonte pour le tracteur et le moteur suivant le procédé secousse et pression ainsi que la fabrication des noyaux suivant le procédé Corning. Le moulage mécanique comporte une sablerie et trois chantiers de moulage (petites, moyennes et grosses pièces), le noyautage mécanique quant à lui, utilise un procédé de type Corning, il dispose de 12 machines à tirer les noyaux de différentes dimensions.

c) Atelier moulage manuel et parachèvement

- **Activité principale**

La production des pièces brutes en fonte pour le tracteur, le moteur et la sous-traitance ainsi que la finition et la peinture des pièces brutes coulées. Toutes les pièces sont acheminées par chariot transporteur vers le parachèvement, le déchargement se fait par pont et potence. Les petites et moyennes pièces sont disposées dans les paniers, les grosses pièces sont disposées sur des chariots.

d) Atelier aluminium

- **Activité principale**

La production et finition des pièces brutes en aluminium pour les moteurs et les tracteurs, par injection et par gravitation.

2.6.4.3. Département forge et construction métallique

a) Atelier de forge

- **Définition**

Le forgeage est un procédé de mise en forme très ancien. En effet il était déjà utilisé durant la préhistoire. Le forgeage permet d'élaborer des pièces brutes par déformation plastique du métal sous effet de chocs ou de pression. Il est le plus souvent exécuté à chaud et conduit à l'obtention d'ébauche dont la forme est assez proche de la pièce finie. Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce de métal de forme voulue par application d'une force mécanique.

- **Estampage**

Le principe de ce procédé consiste à déformer plastiquement à chaud des métaux. Une masse de métal chauffé (lopin) à une température élevée, donc elle sera plus malléable.

Les types d'acier forgés selon la norme DIN :

- 42CrMo4V.
- 42 CrMo4.
- FK20MnCr5.

Les différentes presses d'estampage :

Figure 9 : presses d'estampage.



(Source : Site ETRAG)

b) Atelier Tôlerie métal-soudure

- **Activité principale**

La technologie employée est la déformation de la tôle à froid (estampage, emboutissage). L'estampage à froid permet d'obtenir à partir d'une feuille de tôle, un objet dont la forme n'est pas développable où l'on fabrique les pièces d'habillage des produits d'ETRAG notamment les capots, les réservoirs de carburant, etc...

La tôlerie : a pour mission de fabriquer l'ensemble des pièces en tôle pour le tracteur et les moteurs. Les travaux de tôlerie sont exécutés sur divers emplacements tels que : presse excentrique, plieuse, guillotine et poinçonnage.

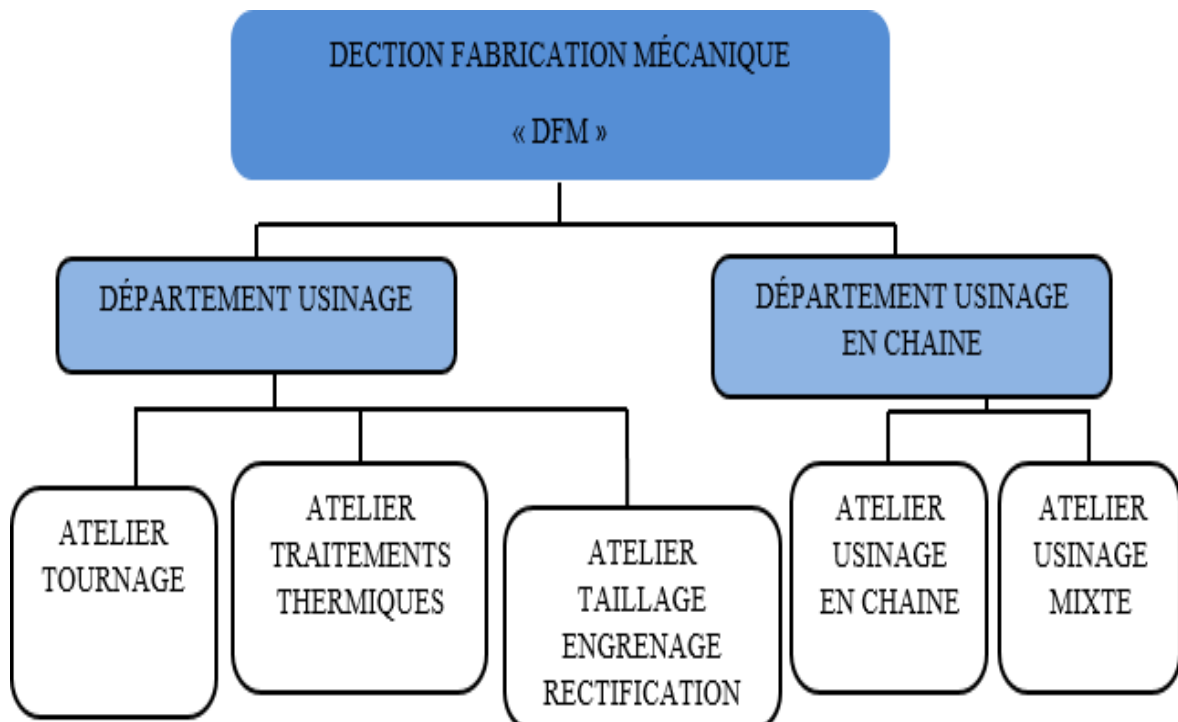
La soudure : a pour rôle de réaliser des assemblages de pièces finies, en utilisant différents procédés tels que : brasage, pointage, soudage au CO2.

L'atelier Tôlerie Métal-soudure se compose de trois sections :

1. Section Tôlerie.
2. Section cintrage débitage.
3. Section Soudure.

2.6.5. Organigramme de la direction fabrication mécanique « DFM »

Figure 10 : Organigramme de la direction fabrication mécanique.



(Source : Documents ETRAG).

2.6.5.1. Direction de fabrication mécanique (DFM)

Activité principale

La Direction de Fabrication mécanique est chargée de mettre à la disposition du montage des pièces conformes aux exigences techniques pour la réalisation du programme de production et des commandes des pièces de rechange. Elle se compose de deux départements qui sont : le département Usinage, le département Usinage en Chaîne.

2.6.5.2. Département usinage

Ce département produit des pièces finies à partir des pièces brutes venant du département fonderie et chaudronnerie. Il est composé de 3 ateliers :

a) Atelier tournage

Basé sur la technologie de tournage (pièces rondes- prismatique), il comprend des tours conventionnels, semi automatiques et numériques partagés sur des sections. Il exécute des opérations de mise en forme de la pièce brute forgée et étirée.

b) Atelier traitements thermiques

Spécialisé dans les traitements thermiques (cémentation, trempe et revenu) trempe sous presse et par induction, traitement de surface (galvanisation et phosphatation).

c) Atelier taillage engrenage et rectification

Il reçoit en général la pièce semi-finie à partir de l'atelier tournage, il fait le taillage et fraisage de denture après le traitement thermique pour amélioration des structures, enfin la rectification des surfaces fonctionnelles comme opération de finition.

2.6.5.2. Département usinage en chaîne

a) Atelier usinage en chaîne

Il regroupe des lignes d'usinage spécialisées chacune dans l'ensemble des opérations d'usinage d'une pièce. On y réalise : les blocs moteurs, les bielles, les cylindres moteurs, les culasses, les vilebrequins et les arbres à cames. L'atelier est également équipé de deux machines à laver pour les opérations de nettoyage et rinçage des pièces finies.

b) Atelier usinage mixte

Ce dernier est spécialisé dans la fabrication de la grosse et la petite Pièces.

2.6.5.3. Département 18 :

Après que l'atelier des moyens de production était autrefois affilié à la EMO Engines Corporation, il s'agit aujourd'hui d'un atelier affilié à la ETRAG Agricultural Tractors Corporation. L'essentiel du travail de l'atelier est axé sur la réalisation des moyens pour l'ETRAG à 90%, et de là est venue l'idée de transférer cet atelier, et puisque les deux institutions appartiennent au Complexe Mécanique Algérien AGM, le processus de transfert et l'intégration de l'atelier n'était ni difficile ni impossible, mais cela a demandé C'est du temps pour; Attribuer la place appropriée à l'atelier, créer les conditions de travail appropriées, déplacer les équipements et les machines avec prudence, ainsi que le processus de transfert du travail d'EMD à ETRAG.

Et en effet, aujourd'hui, c'est l'atelier des moyens de production, un atelier appartenant à la Direction Technique installée et équipée dans l'atelier n° 18, qui est divisé en un département de fabrication, un département de fraisage de creusement, un département de meulage, un département de plomberie et un atelier de fabrication de pièces de rechange 22. Le travail de l'atelier des moyens de production est axé sur l'achèvement des moyens du tracteur MF, tout en continuant à renouveler et à entretenir les moyens de production du tracteur Serta 6807, en fonction de la compétence et de la grande expérience professionnelle de ses ouvriers. Afin d'atteindre les objectifs souhaités en ce qui concerne l'atelier des moyens de production, ETRAG travaille dur pour améliorer les conditions de travail et créer la bonne atmosphère, en cherchant à motiver les ouvriers de l'atelier, qui à leur tour s'efforcent d'atteindre les objectifs fixés avec toute leur expérience et efforts.

Section 03 : Présentation de l'ATC-spa

3.1. Définition : Algerian Tractors Company, abrégée ATC - Spa d'El Khroub, est située à OUED HAMIMIME 25100 EL KHROUB 25000 CONSTANTINE, Algérie.

- Elle a été fondée le 16 août 2012.
- Son siège social est à Constantine.
- La société a été créée avec un capital initial de 1 146 608 400 DA et emploie 104 personnes.

- ATC Spa fabrique des tracteurs agricoles, et le premier tracteur est sorti de ses lignes de production le 17 décembre 2012.
- La capacité de production prévue est de 5000 tracteurs par an, en deux équipes.

ATC Spa est une société mixte résultant d'un partenariat industriel et commercial conclu le 16/08/2012. Ce partenariat associe ETRAG/PMAT et AGCO Massey Ferguson, un leader mondial dans la fabrication de machines agricoles.

- La partie algérienne détient 51% du capital, répartis entre ETRAG (36%) et PMAT (15%).
- Le partenaire étranger, AGCO - Massey Ferguson, détient 49%.

L'histoire du Complexe Industriel Moteurs Tracteurs, « CIMOTRA », remonte à 1970, date du début de sa construction. Le premier tracteur y a été fabriqué le 2 février 1974. En 1982, une restructuration organique a conduit à la création de 11 entreprises nationales. Parmi celles-ci figurait l'Entreprise Publique Économique de Production du Machinisme Agricole, EPE/PMA, qui comprenait CMT. En 1997, CMT est devenue une entreprise indépendante et autonome, sous le statut d'Entreprise Publique Économique, Société par Action (EPE/Spa), spécialisée dans la fabrication de moteurs et de tracteurs agricoles. En 2009, l'EPE/CMT/Spa a été scindée en deux entités : l'Entreprise Tracteurs Agricoles EPE/ETRAG/SPA, dédiée à la fabrication et au développement de tracteurs agricoles, et une entreprise de moteurs.

3.2. Activité de la société :

L'activité principale d'Algerian Tractors Company est la fabrication et l'assemblage de tracteurs agricoles Massey Ferguson et CIRT. Les installations de production de la société comprennent divers équipements de pré-assemblage, d'assemblage, de contrôle et de peinture. En sept ans d'existence, ATC a produit plus de 7100 tracteurs agricoles, offrant une gamme variée de trois types de tracteurs avec une puissance allant de 46CV à 180CV. Les tracteurs sont fabriqués selon la technologie Massey Ferguson, reconnue mondialement pour sa fiabilité. Le tracteur MF 440 Xtra 82 CV est le produit phare de la gamme fabriquée.

3.3. Plan de développement de l'entreprise :

ATC a inclus dans son plan de développement des investissements visant à améliorer ses capacités de production et la qualité de ses produits, afin de répondre aux normes AGCO Massey Ferguson. À la fin du premier trimestre 2017, le bâtiment industriel d'ATC devait être réaménagé pour accueillir une nouvelle chaîne de montage de tracteurs et de transmissions, un banc d'essai pour le contrôle des transmissions et un banc d'essai pour le contrôle final des tracteurs. Ces installations sont destinées à garantir la qualité des tracteurs MF 440 et du Cirta C6807. Ces investissements initiaux seront suivis d'autres améliorations continues pour optimiser le processus de production. Parmi les investissements prévus, on trouve deux installations de peinture pour les carrosseries de tracteurs et les pièces de tôlerie. Tous ces changements devraient donner à ATC une nouvelle dimension dans un avenir proche.

3.4. Agrégats économiques :

- Capital Social : 1 146 608 400 DA
- Activité : Fabrication de tracteurs agricoles
- Capacité théorique de production : 5000 tracteurs en 2 équipes
- Chiffre d'affaires : 7 577 542 000 DA
- Effectif : 180 agents

3.5. Historique de l'entreprise ATC :

Algerian Tractors Company a été créée le 16 août 2012 dans le but de redynamiser la fabrication de tracteurs agricoles sous la marque de renommée mondiale « Massey Ferguson ». La mise en place de la société et le démarrage de son activité ont été réalisés par la société mère ETRAG, qui a fourni un soutien continu pour assurer l'autonomie d'ATC. La délimitation physique d'ATC, visant à organiser et valoriser l'entreprise, en est une preuve. Cette délimitation a pour but de réduire les flux de personnes entre les deux sociétés et d'améliorer la sécurité. La séparation d'ATC d'ETRG permet une meilleure organisation des flux de matières, tant pour les pièces du tracteur C6807 que pour les pièces fabriquées par ETRAG pour le tracteur MF. L'ouverture d'un accès propre à ATC renforce encore l'autonomie de la société et permet à ATC de gérer de manière indépendante les mouvements

de son personnel. La séparation physique et les aménagements en cours ne représentent qu'une partie du développement d'ATC, qui prévoit de nouveaux investissements.

3.6. Les produits fabriqués :

3.6.1. LES TRACTEURS MASSEY FERGUSON (MF) :

La figure présente les différents types de tracteurs MASSY FURGUISSON :

Figure 11 : Les différents types des tracteur MF.



MF7618 180CV 4WD

Tracteur de grande puissance 180 CV



MF440 Xtra 82CV 4WD

Tracteur de puissance 82 CV à quatre roues motrices



MF7150 150CV 4WD

Tracteur de grande puissance 150 CV



MF 415 45 CV

Tracteur de petite puissance 45 CV 2 et 4WD

(Source : Catalogue des tracteurs ATC).

3.6.2. LES TRACTEURS DE CIRTÀ (GERMANY COORPOPRATION) :

Figure 12 : Les différents types des tracteur Cirta.



C 6807



CX 100

2001-2012

360 Tracteurs produits



C 6006

1974-2003

25 261 Tracteurs produits



C 4006

1974-1983

2420 Tracteurs produits



CT 900

1976-1981

205 Tracteurs produits



CX3.70

2003-2010

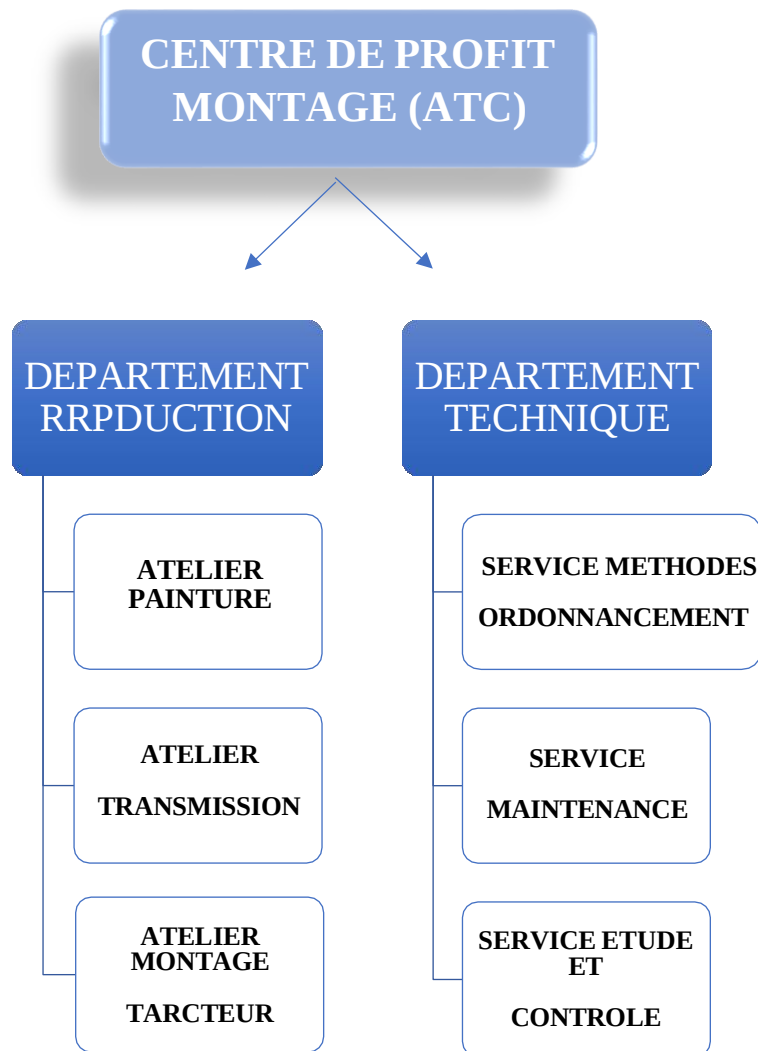
32 Tracteurs produits

(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ATC).

3.7. L'organigramme de l'ATC :

L'organigramme d'ATC est structuré autour du Centre de Profit Montage (ATC) et comprend les départements suivants :

Figure 13 : Organigramme d'ATC



(Source : élaboré par nous à partir des documents ATC).

- **Département Production :**
 - Atelier Peinture
 - Atelier Transmission
 - Atelier Montage Tracteur

- **Département Technique :**
 - Service Méthodes
 - Ordonnancement
 - Service Maintenance
 - Service Étude et Contrôle

3.8. Division technique :

La division technique comprend les directions suivantes :

- Direction technique (DTK)
- Direction maintenance (DM)
- Direction investissement (DI)

3.8.1. Direction technique :

- **Mission :** La direction technique est chargée de :
 - L'élaboration des études techno-économiques pour l'introduction de nouveaux produits
 - L'amélioration des produits existants
 - La réalisation des prototypes
 - L'élaboration des études de normalisation et de standardisation des matières et composants des produits
 - Le développement industriel et du partenariat
- **Structure :** La direction technique est composée de :
 - Département suivi du produit
 - Département contrôle qualité
 - Département méthodes
 - Département gestion outillage

3.8.2. Direction maintenance :

- **Mission :** La direction maintenance a pour rôle de :
 - La maintenance des équipements
 - La maintenance des installations et des utilités

- La gestion des dossiers techniques et de l'historique des machines et des engins, ainsi que leur mise à jour
- La fabrication, la gestion et le suivi des pièces de rechange
- **Structure :** Elle est organisée en :
 - Département maintenance des équipements
 - Département méthodes maintenance et gestion fabrication
 - Département maintenance mécanique

3.8.3. Direction investissements :

- **Mission :** La direction des investissements est chargée de la réalisation et du suivi des investissements au sein de l'entreprise.

Conclusion

Ce chapitre a permis d'exposer la méthodologie adoptée pour analyser les processus de production de l'entreprise ETRAG et d'identifier les axes d'amélioration possibles grâce à l'IA. Les observations et le diagnostic réalisés ont mis en lumière des lacunes dans la gestion des opérations, telles que la maintenance réactive ou la planification manuelle, qui pourraient être optimisées par des solutions technologiques. Par ailleurs, la présentation détaillée d'ETRAG et d'ATC a offert un cadre concret pour envisager l'application de l'IA dans un contexte industriel réel. Les limites méthodologiques, comme le manque de données quantitatives, soulignent toutefois la nécessité d'approfondir certaines analyses. Ces éléments serviront de base pour proposer, dans les chapitres suivants, des solutions concrètes et adaptées aux besoins de l'entreprise.

Chapitre III :

Etude de cas et Solutions

Introduction

Ce chapitre présente une étude approfondie des processus de production chez ETRAG, en mettant en lumière les défis rencontrés et les solutions potentielles offertes par l'intelligence artificielle (IA). À travers un diagnostic détaillé des ateliers de fonderie, forge, construction métallique et usinage, nous identifions les principales lacunes opérationnelles, telles que les défauts de production, les retards et les inefficacités. Ensuite, nous proposons des solutions concrètes basées sur l'IA, comme la maintenance prédictive, le contrôle qualité automatisé et l'optimisation des flux. Enfin, une analyse des bénéfices attendus démontre comment ces technologies peuvent transformer la productivité et la compétitivité d'ETRAG.

Section 01 : Les processus de production chez ETRAG

Cette section se penche sur les processus de production au sein d'ETRAG, en commençant par un diagnostic détaillé des pratiques et systèmes internes de l'entreprise. Elle offre un aperçu des activités clés telles que la fonderie, la forge, la construction métallique, la fabrication mécanique et les moyens de production. Pour chaque activité, sont précisées les caractéristiques essentielles, notamment le nombre d'agents, la superficie, les équipements, la production annuelle, les applications et la mission principale.

Ensuite, la section explore en profondeur les processus de production par atelier, en détaillant les étapes de fabrication dans les départements de fonderie, forge, construction métallique et usinage. Elle identifie également les défauts de production dans chaque atelier et propose des solutions d'intégration de l'intelligence artificielle pour y remédier.

Enfin, la section conclut par une analyse des forces et faiblesses des opérations de production d'ETRAG, des opportunités d'amélioration grâce à l'IA et des recommandations pour optimiser davantage les processus.

1.1. Le Diagnostic des Pratiques et Systèmes Internes

Ce diagnostic met en évidence les fondements opérationnels d'ETRAG, révélant à la fois des pratiques efficaces et des axes de progrès. Les forces identifiées, telles que la maintenance préventive et l'utilisation du système ERP SAT LINE, démontrent une base solide pour la production. Cependant, des faiblesses persistantes, comme la gestion manuelle de certaines étapes, soulignent la nécessité d'une modernisation accrue. Cette analyse prépare le terrain pour une évaluation approfondie des performances et des opportunités d'optimisation, notamment via l'intégration de l'IA.

1.1.1. Les points faibles et les points forts des opérations de production chez ETRAG**a) Forces observées**

- **Maintenance préventive en place** : L'entreprise dispose d'un système de maintenance préventive, ce qui réduit les risques de pannes imprévues et optimise la durée de vie des équipements. Cela permet d'éviter les interruptions fréquentes de production liées aux défaillances des machines.
- **Système de gestion des stocks (SAT LINE ERP)** : L'utilisation du système ERP SAT LINE pour la gestion des stocks est un atout majeur. Ce système permet une gestion plus structurée des stocks de matières premières et de pièces, assurant ainsi une meilleure planification des besoins en matériaux.
- **Partenariats stratégiques** : L'accord de partenariat avec AGCO Massey Fergusson renforce la compétitivité de l'entreprise et permet l'intégration de nouvelles technologies dans le processus de production.

b) Faiblesses identifiées

- **Gestion manuelle dans certaines étapes de production** : Malgré l'utilisation du système ERP, certains aspects du processus de production, notamment l'assemblage des tracteurs, restent largement manuels. Cela peut conduire à des inefficacités, des délais de production plus longs et un risque d'erreurs humaines.
- **Temps de production élevés dans certaines étapes** : Même si la maintenance préventive est efficace, le temps de production pourrait être réduit en optimisant davantage les processus de fabrication et en utilisant des technologies d'automatisation et d'IA pour la planification de la production.
- **Qualité contrôlée manuellement** : Bien que la maintenance préventive soit bien en place, le contrôle qualité reste un processus manuel. Cela peut entraîner une variabilité de la qualité des produits finis, même si des efforts sont faits pour le réduire.

1.1.2. Opportunités d'amélioration avec l'intelligence artificielle

- **Optimisation de la gestion des stocks avec l'IA** : Bien que le système ERP SAT LINE soit efficace, l'intégration de l'intelligence artificielle dans le système de gestion des stocks permettrait d'améliorer la précision des prévisions de demande, d'optimiser les commandes de pièces et de réduire les risques de rupture ou de surstockage.
- **Maintenance prédictive avancée** : Bien que la maintenance préventive soit un bon point, l'introduction de la **maintenance prédictive** basée sur des algorithmes d'IA permettrait de prédire avec plus de précision les défaillances des équipements, d'optimiser les coûts et de réduire les interruptions de production dues à des pannes non anticipées.
- **Réduction des temps de production avec l'IA** : En combinant l'IA avec le système ERP pour mieux planifier la production, l'entreprise pourrait optimiser les processus, réduire les délais et mieux gérer les ressources disponibles. Par exemple, l'IA pourrait être utilisée pour anticiper les besoins en matière première et ajuster automatiquement les programmes de production en fonction des variations de la demande.
- **Automatisation du contrôle qualité** : L'intégration de la vision industrielle et des systèmes de détection d'anomalies basés sur l'IA permettrait de réduire les erreurs humaines et d'assurer une qualité constante dans la production des tracteurs, réduisant ainsi le taux de défauts.

1.1.3. Recommandations

- **Renforcer l'utilisation de l'IA dans la gestion des stocks** : En optimisant le système ERP SAT LINE avec des algorithmes de prévision basés sur l'IA, ETRAG pourrait réduire encore plus les coûts liés aux excédents ou aux ruptures de stock. Un modèle de prévision plus précis permettrait d'ajuster la production et les achats en temps réel.
- **Évolution de la maintenance vers la maintenance prédictive** : L'intégration de la maintenance prédictive permettrait de détecter les problèmes avant qu'ils ne surviennent, réduisant les coûts de maintenance et les arrêts imprévus. L'utilisation

de capteurs intelligents et de l'IA pour surveiller l'état des équipements serait bénéfique.

- **Automatisation de certaines étapes de la production** : Bien que l'entreprise dispose d'une infrastructure de production solide, certaines étapes, telles que l'assemblage final, pourraient bénéficier d'une automatisation supplémentaire, ce qui augmenterait la productivité et réduirait les erreurs humaines.
- **Implémentation de systèmes de contrôle qualité automatisés** : L'utilisation de l'IA pour automatiser les inspections de qualité garantirait une meilleure fiabilité des produits finis, réduisant ainsi le taux de retour des produits défectueux et augmentant la satisfaction des clients.

1.2. Présentation des Ateliers et de Leurs Capacités

Les ateliers d'ETRAG constituent les piliers de sa chaîne de production, chacun spécialisé dans des procédés distincts. Les tableaux ci-dessous détaillent leurs caractéristiques clés, allant des ressources humaines et matérielles aux volumes de production et missions spécifiques. Cette synthèse permet de saisir l'ampleur des opérations et d'identifier les synergies potentielles entre ateliers, tout en ciblant les domaines où l'IA pourrait renforcer l'efficacité.

a) ACTIVITÉ FONDERIE

Tableau V : Caractéristiques de l'activité Fonderie.

Caractéristique	Détail
Nombre d'agents	170
Superficie totale	15 000 m ² (13 000 m ² couverts)
Nombre d'équipements	90 machines, 9 installations industrielles
Type de fonte	Fonte à graphite lamellaire et sphéroïdale
Production annuelle	232 000 pièces (2 000 tonnes)
Poids des pièces	De 160 g à 250 kg
Applications	Tracteurs CIRTÀ, MF et moteurs DEUTZ
Nombre de positions	55 (CIRTÀ/MF) et 30 (DEUTZ)
Mission principale	Fournir les pièces de brut de fonderie (fonte/aluminium).

(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ETRAG)

b) ACTIVITÉ FORGE

Tableau VI : Caractéristiques de l'activité Forge.

Caractéristique	Détail
Nombre d'agents	53
Superficie totale	2 000 m ²
Nombre d'équipements	35 équipements industriels
Production annuelle	135 000 pièces
Poids des pièces	De 200 g à 40 kg
Applications	Tracteurs CIRTÀ, MF et moteurs DEUTZ
Nombre de positions	56 (CIRTÀ/MF) et 10 (DEUTZ)
Mission principale	Produire des composants de brut de forge.

(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ETRAG)

c) ACTIVITÉ CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Tableau VII : Caractéristiques de l'activité Construction Métallique.

Caractéristique	Détail
Nombre d'agents	52
Superficie totale	6 000 m ²
Nombre d'équipements	41 machines et équipements industriels
Procédés utilisés	Estampage, Emboutissage, Pliage, Oxycoupage, Soudure, Cintrage de tube et de profilé, Découpe laser
Production annuelle	1 275 000 pièces
Applications	Tracteurs CIRTÀ, MF et moteurs DEUTZ
Nombre de positions	96 (CIRTÀ/MF) et 65 (DEUTZ)
Mission principale	Réaliser et assembler les pièces finies en tôle.

(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ETRAG)

d) ACTIVITÉ MOYENS DE PRODUCTION

Tableau VIII : Caractéristiques de l'activité Moyens de Production.

Caractéristique	Détail
Superficie totale	1 000 m ²
Nombre d'équipements	30 équipements et installations industriels
Production annuelle	120 moyens de production
Produits fabriqués	Matrices, dispositifs, accessoires d'outillage
Mission principale	Réalisation et entretien des dispositifs, matrices, et accessoires pour l'usinage et la construction métallique.

(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ETRAG)

e) FABRICATION MECANIQUE

Tableau IX : Caractéristiques de l'activité Fabrication Mécanique.

Caractéristique	Détail
Nombre d'agents	382
Nombre d'équipements	442 machines et équipements industriels
Production annuelle	1 500 000 pièces
Applications	Tracteurs CIRTÀ, MF et moteurs DEUTZ
Nombre de positions	363 (CIRTÀ/MF) et 157 (DEUTZ)
Mission principale	Fabrication de pièces mécaniques pour les tracteurs et les moteurs.

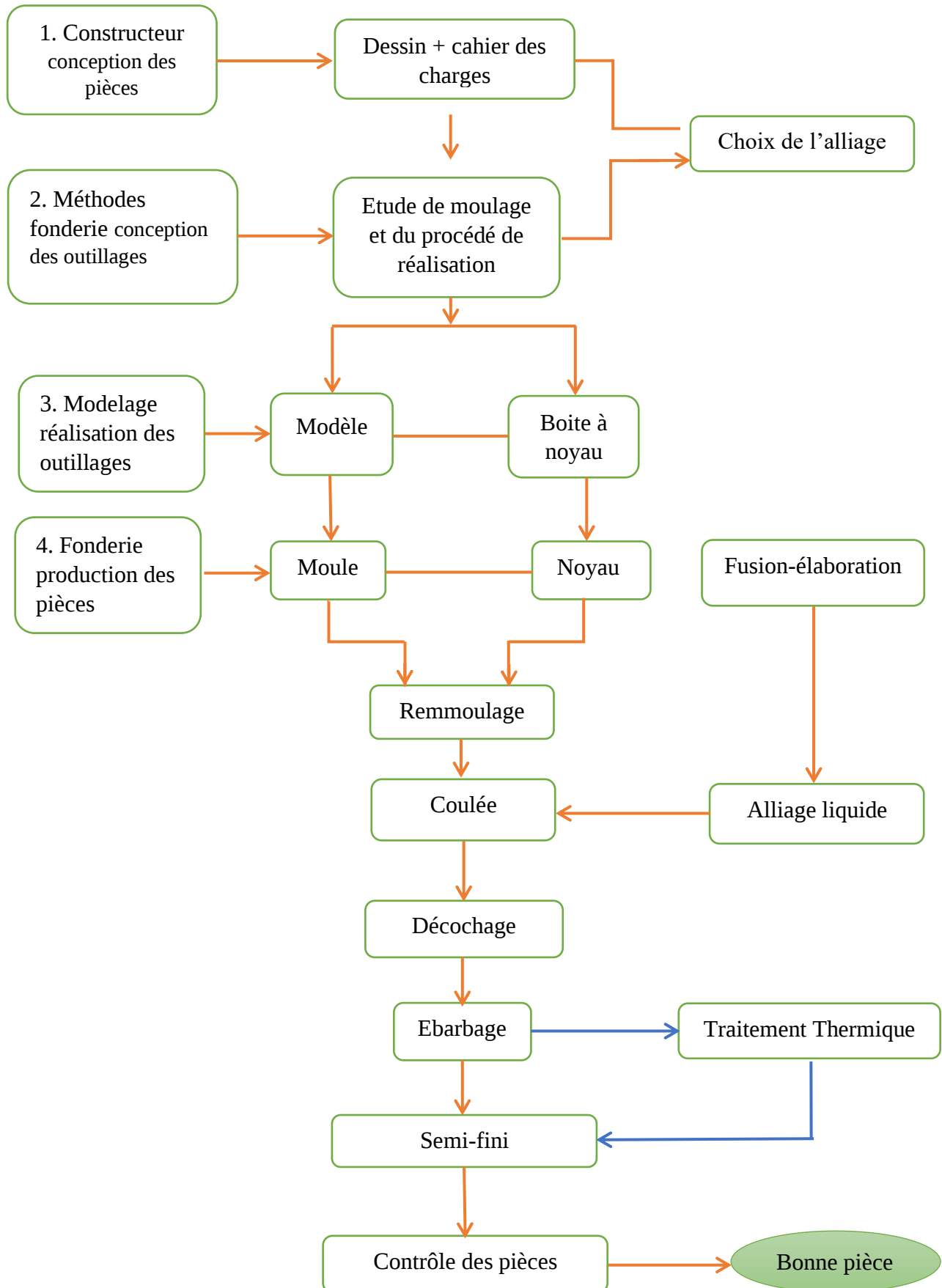
(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ETRAG)

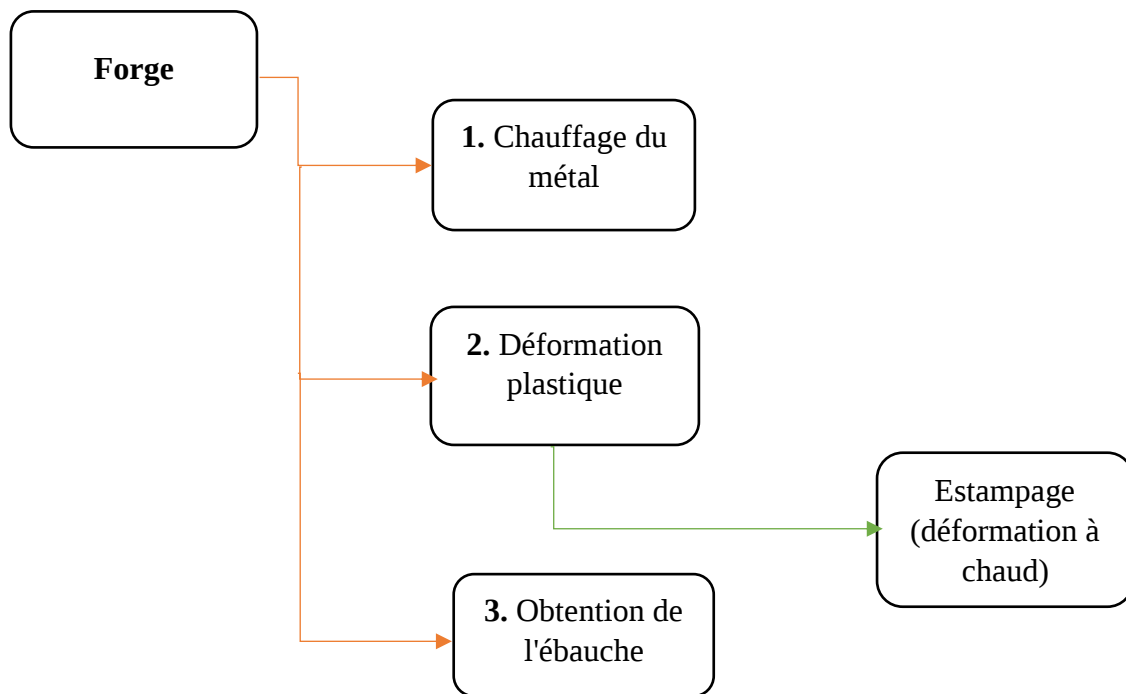
1.3. Processus de production par atelier

Les schémas suivants illustrent les étapes clés des processus de production dans chaque atelier, mettant en évidence les opérations techniques et les flux de fabrication propres à chaque département.

1.3.3. Département fonderie

Figure 14 : Processus de production d'une pièce coulée en fonderie.

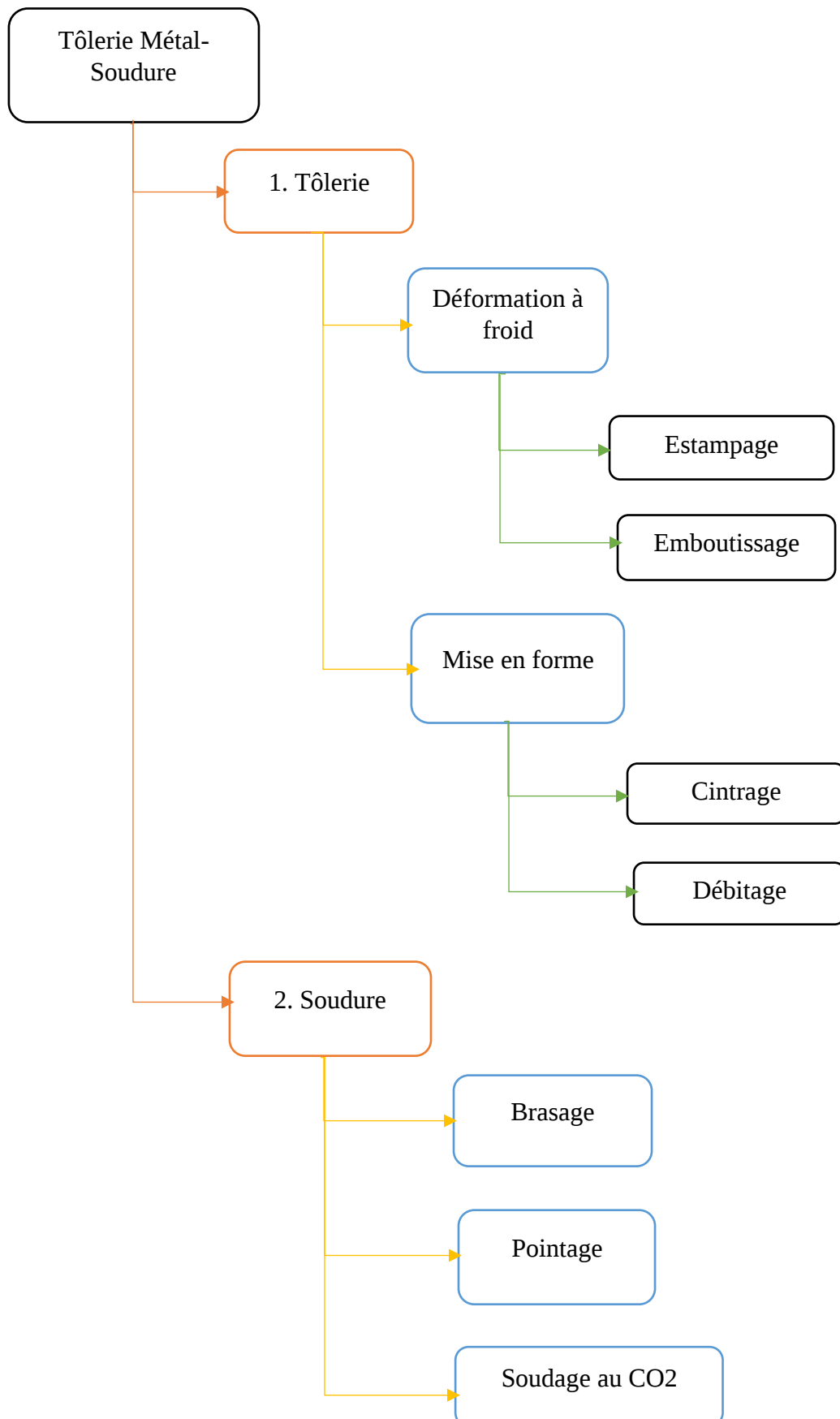


1.3.4. Forge et construction métallique**a) Forge****Figure 15 : Processus de production dans l'atelier de forge.**

(Source : élaboré par nous-même).

b) Tôlerie-métal-soudure

Figure 16 : Processus de production en tôlerie-métal-soudure.

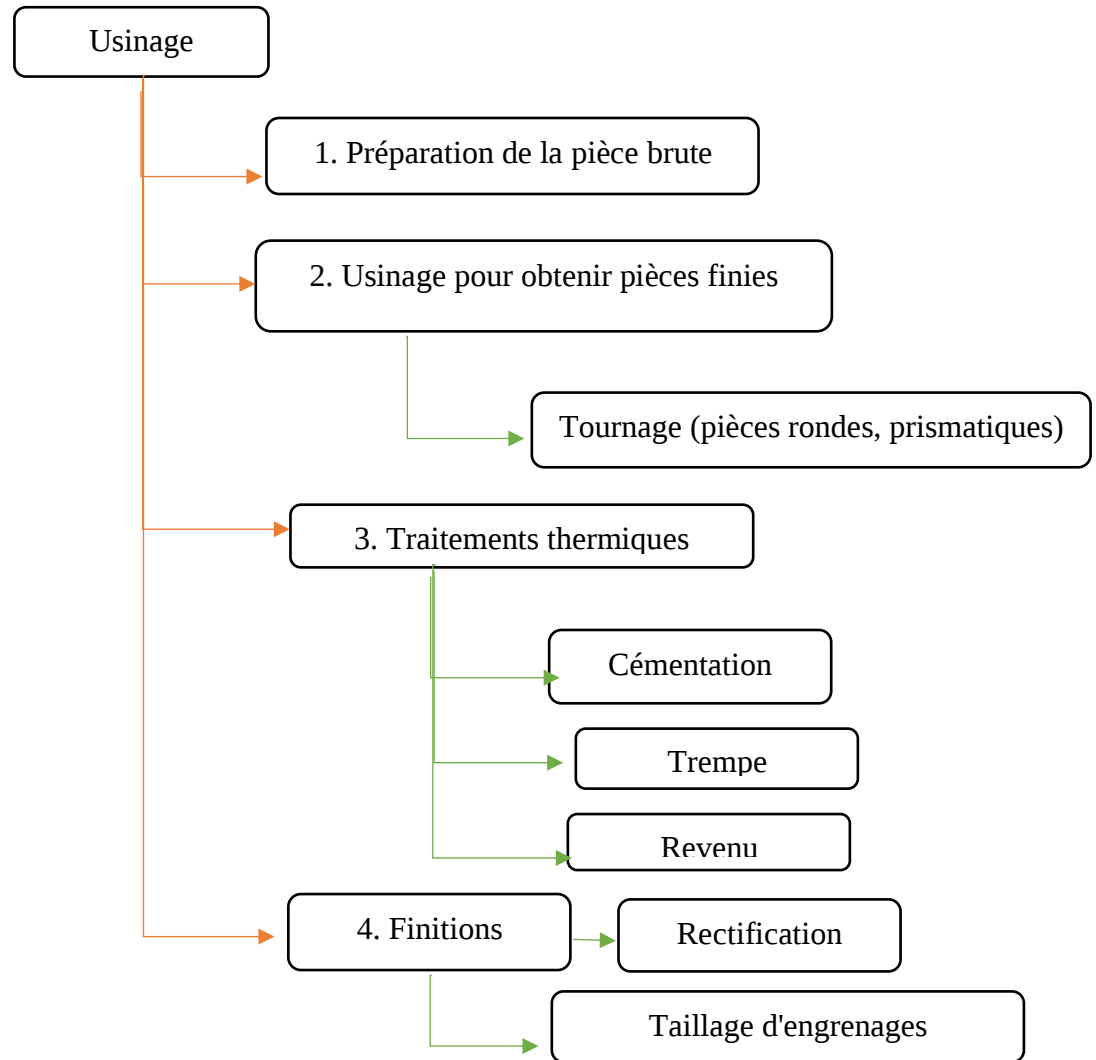


(Source : élaboré par nous-même).

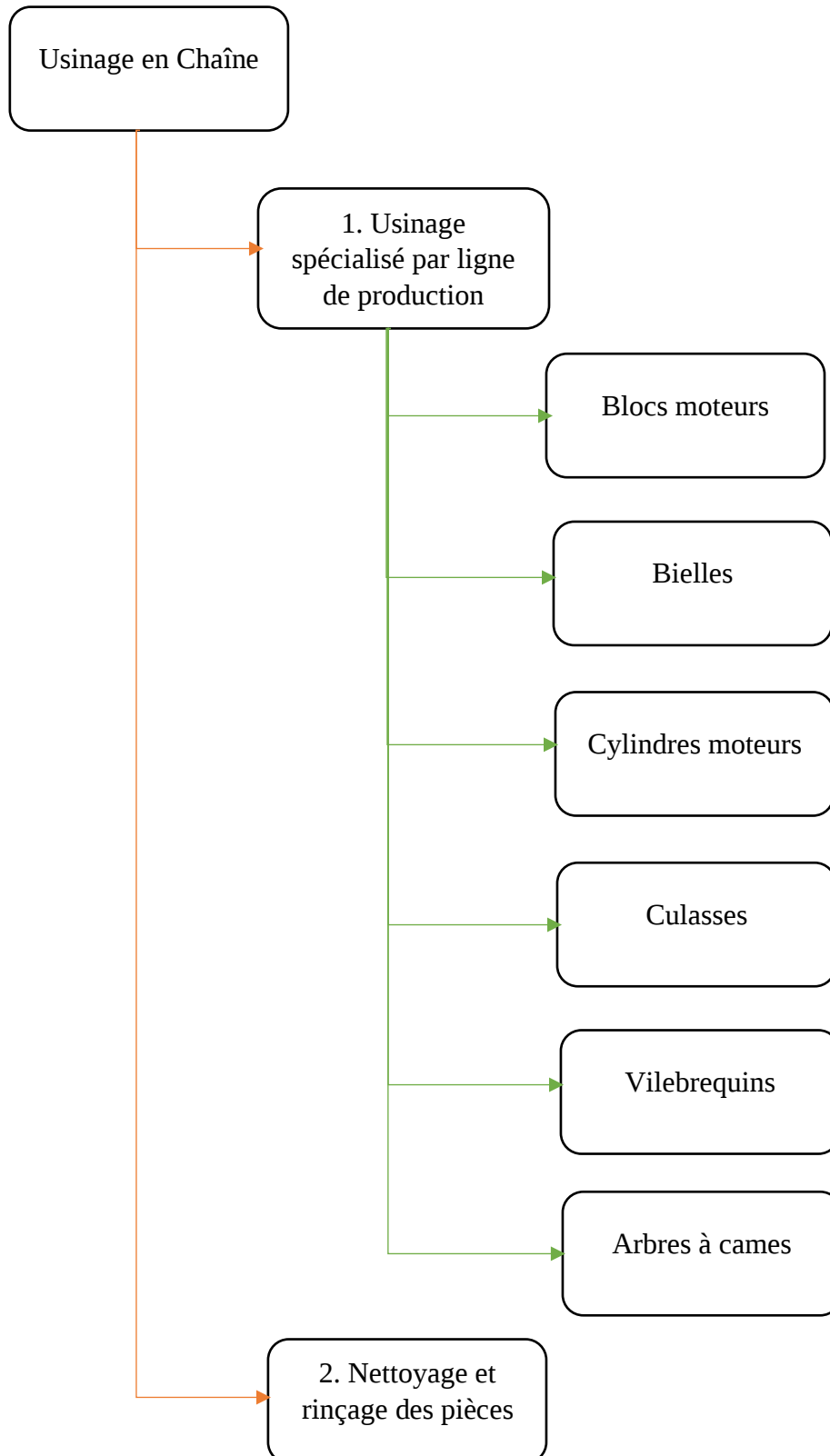
1.3.5. Département Usinage

a) Atelier Usinage

Figure 17 : Processus d'usinage des pièces mécaniques.



(Source : élaboré par nous-même).

b) Atelier Usinage en Chaîne**Figure 18 : Processus d'usinage en chaîne pour les composants moteurs.**

(Source : élaboré par nous-même).

1.4. Analyse les Défauts de Production par Atelier et Proposition d'Intégration de l'IA

Après cette analyse, nous avons fait sortir quelques défauts pour chaque atelier et auxquels nous avons proposés des solutions.

1.3.1. Atelier Fonderie

- **Défauts identifiés :**
 - Porosités dans les pièces en fonte et aluminium.
 - Variations de qualité dues à des paramètres de coulée non optimisés.
 - Temps d'arrêt fréquents pour maintenance corrective.
- **Solutions IA :**
 - **Maintenance prédictive :** Utilisation de capteurs IoT pour surveiller la température des fours et les vibrations des machines, couplés à des algorithmes (LSTM, Random Forest) pour anticiper les pannes.
 - **Contrôle qualité automatisé :** Caméras industrielles avec YOLOv8 pour détecter les défauts visuels (porosités) en temps réel.
 - **Optimisation des paramètres :** Algorithmes génétiques pour ajuster automatiquement les paramètres de coulée (température, pression) en fonction des données historiques.

1.3.2. Atelier Forge

- **Défauts identifiés :**
 - Pièces mal estampées ou fissurées.
 - Usure prématurée des outils (matrices).
 - Gestion manuelle des stocks de matières premières.
- **Solutions IA :**
 - **Vision industrielle :** Détection des défauts d'estampage avec des CNN.

- **Maintenance prédictive** : Surveillance de l'usure des outils via capteurs et prédiction des remplacements nécessaires.
- **Gestion des stocks** : Système ERP intégré à l'IA pour optimiser les commandes de matières premières et réduire les ruptures.

1.3.3. Atelier Construction Métallique

- **Défauts identifiés** :
 - Défauts de soudure (manques, fissures).
 - Erreurs de découpe laser (dimensions incorrectes).
 - Retards dus à des réajustements manuels.
- **Solutions IA** :
 - **Détection des soudures défectueuses** : YOLOv8 pour analyser les soudures en temps réel et alerter les opérateurs.
 - **Optimisation de la découpe laser** : IA pour ajuster automatiquement les paramètres de découpe en fonction du matériau.
 - **Ordonnancement intelligent** : Algorithmes génétiques pour optimiser l'ordre des tâches et réduire les temps d'attente.

1.3.4. Atelier Usinage Mécanique

- **Défauts identifiés** :
 - Pièces hors tolérance (usure des outils).
 - Temps de production élevés dus à des goulots d'étranglement.
 - Contrôle qualité manuel (lent et sujet aux erreurs).
- **Solutions IA** :
 - **Contrôle dimensionnel automatisé** : Caméras et capteurs pour vérifier les pièces usinées et comparer aux spécifications.
 - **Maintenance prédictive** : Surveillance des outils de coupe pour anticiper leur remplacement.

- **Optimisation des flux** : Algorithmes d'IA pour répartir les tâches entre les machines et réduire les temps d'inactivité.

Section 02 : Etude de cas sur la ligne d'assemblage du tracteur C6807

La gestion de montage du tracteur C6807 se compose de trois chaînes :

- Chaîne de transmission.
- Chaîne de peinture.
- Chaîne de Montage finale.

Dans cette étude on va détaillé et expliqué les trois chaines en respectant l'ordre de montage défini par la gamme d'assemblage.

A. Les Données techniques du tracteur type C6807

Tableau X : Données techniques du tracteur C6807.

Marque	Cirta
Type	C6807
genre	Tracteur Agricole (variante)
Poids totale autorisé en charge	5000KG
Nombre de places ass	2 (y compris le conducteur).

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

- **Constitution générale du véhicule :**
 - 2 essieux- 4 roues (de deux motrices).
 - Moteur, boîte de vitesse, pont arrière formant monobloc.

B. Dimensions et poids

Tableau XI : Performance générales sur le tracteur C6807.

Empattement	2150 mm
Voie AV variable	1420-1920 mm
Voie AR variable	1520-1825 mm
Longueur totale	3720 mm
Largeur totale variable	1960-2325 mm
Auteur totale avec tuyau d'échappement	2750 mm

Hauteur libre au-dessus du sol AV	505 mm
Hauteur libre au-dessus du sol AR	6600 mm
Hauteur de la chape d'attelage variable	700 à 900 mm
Hauteur au-dessus du sol de la prise de force	635 mm
Poids à vide en ordre de marche	2550 KG
Soit sur essieu AV	895KG
Soit sur essieu AR	1655 KG
Poids totale autorisé	5000 KG
Soit sur essieu AV	1760 KG
Soit sur essieu AR	4000 KG

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

- **Pneumatique :**

Tableau XII : Performance pneumatique.

Dimensions des pneus AV	7,50-16 AS/FR
Dimensions des pneus AR	16,9/14-30 AS

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

C. Moteur :

Type F4L 912 Diesel à injection directe à 4 tempe- 4 cylindres en lignes.

Tableau XIII : Performance du moteur.

Démarrage	À froid par bougie de préchauffage
Alésage 100 mm	Course 120 mm
Cylindrée	3768 cm³
Puissance administrative	15 CV
Taux de compression	17 : 1
Carburant	Gas-Oil
Quantité du réservoir	92 litres

Régime maximum du moteur	2300 tr/min
Couple maximum du moteur maxi	22,4 M/KG à 1550 tr/min
Niveau sonore de bruit de tracteur	86,5 dB (A)
Mesure de l'opacité de la fumée	Conforme aux prescriptions
Alimentation	Pompe d'injection
Alternateur	12V-33A-batterie de 12V 110 AH
Démarrreur	12V-2,4 KW incorporé
Graissage	Sous pression
Refroidissement	Air, par turbine axiale en traînée par courroie (9,5x1500)
Consommation du combustible	1670 g/ch
Montée du couple	12%

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

D. Transmission du mouvement :

- Le mouvement du moteur est transmis à la boîte par un embrayage bi disque à sec au volant DT 250/295 N.
- La chaîne cinématique de transmission TW 55-4 est conçue pour obtenir : 8 vitesses à l'arrière non synchronisées.
- Quatre démultiplications en marche AV à vitesses lentes (L).
- Quatre démultiplications en marche AV à vitesses rapides (S).
- Quatre démultiplications en marche AV(R).

• Combinaison des vitesses en Km/h.

Tableau XIV : combinaison de vitesse.

	<u>Lentes (L)</u>	<u>Rapide (S)</u>	<u>Marche arrière (R)</u>
1 ^{ère} vitesse	2,23	9,11	5,31
2 ^{ème} vitesse	3,41	13,95	8,21
3 ^{ème} vitesse	4,41	18,08	10,65
4 ^{ème} vitesse	5,91	24,21	14,26

Au régime maximum du moteur 2300 tr/min, la vitesse maximum du véhicule ressort à 26,5Km/h.

Un compteur combiné indique le régime moteur, les vitesses et heures de service du véhicule.

- Quantité d'huile dans la boîte de vitesse.
- Couple conique.
- **Essieu arrière :**
 - En traînement avec pignons droit et conique à denture hélicoïdale avec différentiel.
 - Blocage du différentiel par levier à pied.
- **Essieu avant**

Tableau XV : performance de l'essieu avant.

Type	Vis sans fin mécanique
Marque	ZF Gemmes modèle 73
Rapport de transmission	22/1
Diamètre de braquage sans frein de direction	7 ,6 m
Diamètre de braquage avec frein de direction	6,8 m

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

E. Direction

Ce tracteur est doté de deux sortes de freins :

- **Frein principal :**

Frein à tambour avec commande à pied, agissant sur chaque roue arrière simultanément (ou séparément pour un virage minimum) par l'intermédiaire de 2 pédales.

Un verrouillage mécanique permet d'accoupler ces 2 pédales.

Tableau XVI : Les données du frein principal.

Diamètre du tambour	250 mm
Largeur de la garniture	70 mm
Surface de freinage totale effective	380 cm ²

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

- **Frein de parcage**

Frein à cliquet agissant sur chaque 1/2 arbre de différentiel.

Tableau XVII : Données du frein parcage.

Diamètre du tambour	180 mm
Largeur de la garniture	30 mm
Surface de freinage totale effective	112 cm ²

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

F. Eclairage

Tous ces dispositifs sont fixés aux emplacements réglementaires.

Tableau XVIII : Données des éclairages.

Éclairage électrique	12 V
2 Projecteurs type agréées	Deux de route-feux de croisement-feux de position
Feux arrières	2 feux rouge-sigale de stop-clignotant et rage plaque
2 Catadioptrés	Type agréèrent

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

G. Relevage hydraulique : Type K45-1

Tableau XIX : Tableau contient les performances de relevage hydraulique du type K45-1.

Pression de service	200 bars
Attelage à 3 points	Catégorie II
Pompe hydraulique sans direction	14 cm ³ /tr
Pompe hydraulique avec direction	34,6 cm ³ /tr
Force de levage à la barre d'attelage	2160-2630 KG

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

H. Prise de force

Prise de force liée directement au moteur disposé à l'arrière dans le plan vertical du tracteur.

Tableau XX : Prise de force.

Couple maxi autorisé	160 m.KG
Embrayage	Disque à double effet
Dimensions	13/8 x 75 mm
Régime prise de force pour le régime nominal du moteur	540 tr/min pour le régime moteur 2020/tr
Sens de rotation	Sens des aiguilles d'une montre
Nombre de tours au régime max du moteur	615tr/min

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

I. Jantes utilisées**Tableau XXI : Les caractéristiques des jantes.**

Avant	5,50 x 16
Dimensions des boulons de roue	160
Désignation des boulons	M14x1,5
Nombre des boulons par roue	5
Arrière	W 14Lx30
En trax	205
Dimension des boulons roue	M18x1,5
Nombre des boulons par roue	8

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

J. Alourdissement du tracteur :**Tableau XXII : Performance d'alourdissement du tracteur.**

Contre poids incorporés au berceau d'essieu	55 KG
Contre poids montrés sur roues arrière	Possibilité de 2 à 11 masses de 27 KG
Poids maximum par roue	162KG, 324KG en total
Masse d'alourdissement	De 1 à 11 masses de 22 KG, soit au total 242 KG

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

K. Divers :**Tableau XXIII : diverses caractéristiques du tracteur C6807.**

Plaque constructeur	A droite sur le berceau d'essieu
Marquage à froid	A droite sur le carter d'embrayage
Plaque d'identification moteur	A gauche sur le bloc
Echappement	Pot oblong 190x100 à de chambre

(Source : catalogue des pièces de tracteur C6807).

2.1. Chaîne de montage

Atelier de chaîne de montage

Figure 19 : chaîne de montage.

(Source : site ATC)

Après avoir reçu les pièces du tracteur d'ETRAG et les moteurs de PMO, le tracteur commence à s'assembler dans la chaîne de montage qui elle-même est composée de :

- Chaîne de transmission
- Chaîne de montage
- Chaîne de peinture

2.1.1. Chaîne de transmission

Phase 01 : Accouplement de la boîte Vitesse et pont arrière :

Dans le premier poste de cette chaîne, les ouvriers accouplent le pont arrière et la boîte vitesse après qu'ils soient pré-montés :

Le premier poste de la chaîne de transmission :

Figure 20 : accouplement de pont arrière avec la boîte vitesse



(Source : photo réel).

○ Pré-montage de la boîte vitesse :

Premièrement :

- Souffler les différentes roues dentées.
- Enduire de la graisse + l'huile sur les roues dentées.
- Pré assemblage des roues (bague + cage à aiguille).

Deuxièmement :

- Définir l'épaisseur de cal (x).

$$X = A + B - C - D + K.$$

Tableau XXIV : les valeurs intégrées dans le calcul de cal x.

a	Une côte sur le pont arrière (la surface de contact l'axe de la couronne
B	Une côte sur la boîte vitesse (logement du roulement)
C	Une côte du centre de la couronne jusqu'à l'extrémité du pignon d'attaque
D	Epaisseur du roulement
S	Valeur de la cale x

(Source : élaboré par nous-même à partir des documents ATC).

+**-K** : (ΔS).

Prendre les quatre cotes inscrites sa :

1-Carter boite de vitesse.

2-Carter pont arrière.

3-Valeur couple.

4-Épaisseur roulement.

Troisièmement :

- Montage du roulement sur le pignon d'attaque.

Figure 21 : les épinions de la boite vitesse.



○ **Montage de la boite de vitesse**

1-Accrocher dispositif de manutention sur carter de boite de vitesse et le poser sur le chevalet de montage.

2-Ebavurer et nettoyer tous les perçages et plan d'assemblage de boite de vitesse.

3-Loger goupille cylindrique puis monter les deux bagues extérieures de roulement à galets avec la cale S.

4-Monter l'arbre du pignon d'attaque pré assemblé avec tous les pignons en respectant l'ordre de fonctionnement.

5-Montage de : Roulement- rondelle- cale de freinage- rondelle à talon- écrin à créneau et serrer.

Couple de serrage = [25 % 30] kgf.

6-Montage dans le carter à boîte de vitesse : l'arbre de marche arrière- roulement- roues dentée- arrêter avec circlips.

7-Montage d'arbre creux primaire pré assemble et le roulement à galets dans le carter.

8-Monter roulement sur arbre creux pré assemblé et le monter et le montage et le freinage avec circlips puis enfiler l'arbre de boîte de vitesse à l'arbre creux et l'arrêter avec circlips- vérifier en frappant de légers coups de masse de bronze la bonne mobilité des pignon montés sur arbre creux.

9-Monter les fourchettes sur la boîte de vitesse (fourchette déjà pré montée- bille- ressort- axe de fourchette.

10-Contrôle le passage de la vitesse et des gammes. Montage de boîte vitesse :

10- Montage de boîte vitesse :

Figure 22 : carter boîte de vitesse.



Figure 23 : montage des fourchettes de vitesse.



Figure 24 : montage épinions.



- **Montage du pont arrière**

Pont arrière assemblé :



Figure 25 : pont arrière.

1. Pré-montage des arbres males et femelles



Figure 26 : arbres males et femelle.

2. Pré-montage de carter traction arrière (pastilles pédale crabotage)



Figure 27 : le carter.

3. Accrocher dispositif de manutention sur carter pont arrière et le poser sur le chevalet de montage.
4. Accouplement d'arbre intermédiaire femelle avec le déférentielle
5. Accouplement des arbres intermédiaire avec les grandes roues

Figure 28 : montage des grandes roues.



6. Pression pneumatique des roulements, épinions et arbres.

Figure 29 : pression pneumatique.



7. Montage des serres clipse.

Phase 02 : assemblage de prise de force

Montage de prise de force :

Figure 30 : assemblage de prise de force.



Monter l'arbre du pignon d'attaque pré assemblé avec tous les pignons en ordre en respectant l'ordre de fonctionnement.

Phase 03 : assemblage des trompettes :

Montage des trompettes gauche et droite :

Figure 31 : montage des trompettes.



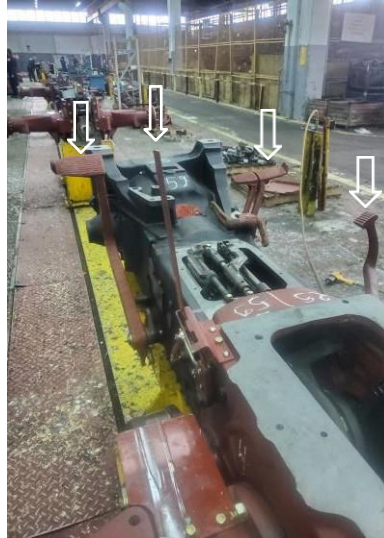
- Enduire de l'Octite les goujons de fixation de la trompette droite et serrer
- Enduire le plan d'assemblage pont arrière / trompette de la pâte hermétique
- Monter trompette droite
- Monter le graisseur

Serrer un Serrage d'approche puis Vérifier le Couple de serrage pont arrière / trompette.

Phase 04 : montage des accessoires :

Montage des accessoires sur la transmission :

Figure 32 : montage des accessoires.



(Source : élaboré par nous-même).

Dans cette phase on monte les accessoires suivants :

- Les pédales de freinage.
- Les pédales d'accélération.
- Les pédales d'embrayages.
- Les pédales de crabotage.
- Montage des couvercles de la boîte vitesse.
- Montage de l'installation hydraulique.

Montage de l'installation hydraulique.

Le vérin de l'installation hydraulique :

Figure 33 : installation hydraulique avant le montage.



Les étapes de montage de l'installation hydraulique sont :

- Accrocher dispositif de manutention sur le vérin hydraulique complet et le poser sur le chevalet de montage.
- Assemblage du Reniflard.
- Assemblage de filtre de retour.
- Assemblage Soupape de Sécurité et le bouchon.
- Assemblage de distributeur et le vis de distributeur.
- Pré-montage puis l'Assemblage d'arbre de Levage.
- Assemblage de Segment / Secteur.
- Assemblage des bras.
- Tester le fonctionnement d'installation hydraulique. Fin de la phase montage de l'installation hydraulique :

Figure 34 : installation hydraulique complète.



Phase 05 : montage des bouchons et marche pied :

- Monter marche pied à la face de dessous de la chaîne cinématique
- Cacher les 16 goujons des axes de roues côté gauche et droit en montant les 16 bouchant
- Visser les 2 bouchons à téton magnétique à la face de dessous de la chaîne cinématique
- Monter les équerres d'attaches (chevalet de stabilisation côté gauche et droit)

Et puis on obtient une transmission complète et on Pousser le chariot en ramenant la chaîne cinématique jusqu'à la chaîne de peinture.

Fin de montage de la transmission :

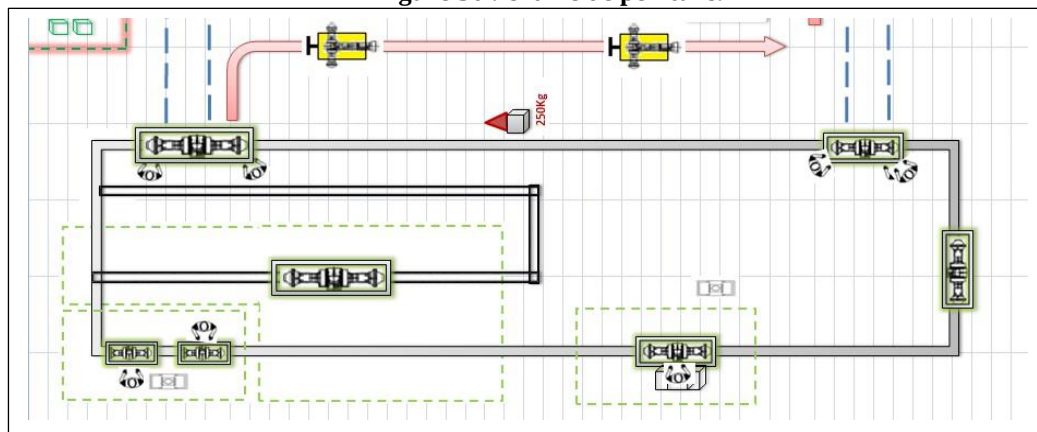
Figure 35 : transmission complète.



2.1.2. Chaîne de peinture

Illustration de la chaine de peinture :

Figure 36 : chaine de peinture.



(Source : Documents ATC).

Phase 01 :

On accroche les transmissions complètes par des crochets automatiquement mobile et l'opération de peinture sera fait automatiquement en commençant par le lavage complet de la transmission.

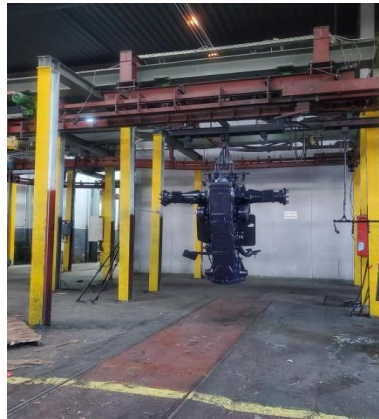
Phase 02 :

Après le lavage, la transmission sera emmenée à la chambre de peinture pour être entièrement peinte par une peinture noire spéciale.

Phase 03 :

Finalement, après avoir été complètement peint, elle se dirige vers le four pour que la peinture sèche à un certain degré de chaleur.

Figure 37 : la fin de l'opération de peinture.



Comme une dernière étape, le clark la tiendra et l'amènera à un stock momentané afin qu'il puisse être pris pour la chaîne de montage.

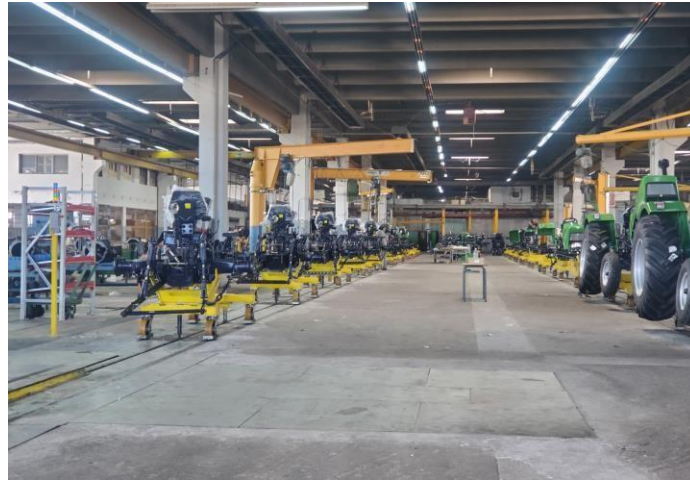
Figure 38 : stock transite de transmission.



2.1.3. Chaîne de montage

Le circuit de la chaîne montage finale :

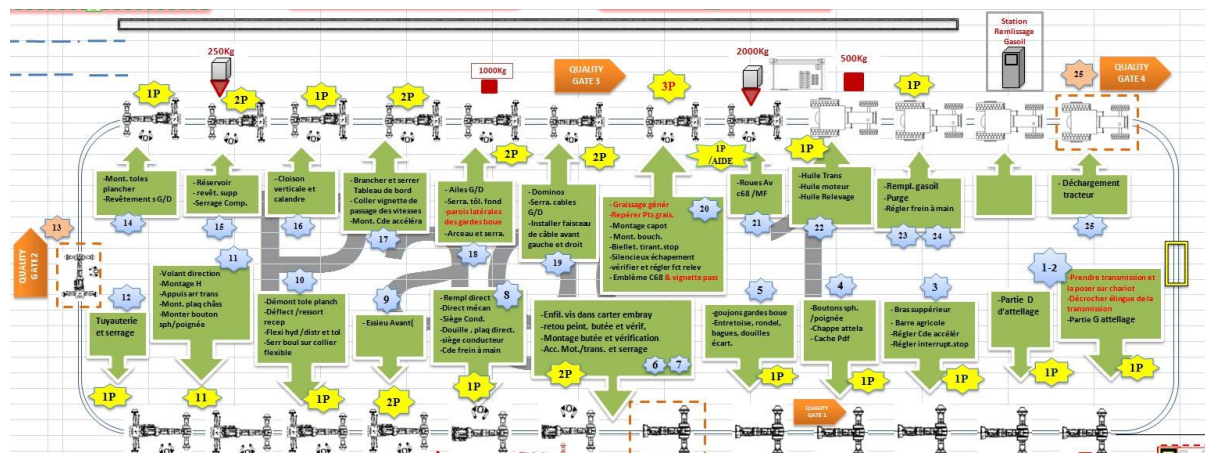
Figure 39 : la chaîne de montage.



(Source : site ATC).

La chaîne de montage finale du tracteur C6807 :

Figure 40 : illustration des phases de la chaîne montage.



(Source : Documents ATC).

Les phases de la chaîne montage sont :

1. On prendre la transmission et la poser sur le chariot et décrocher élingue de la transmission
2. L'attelage de la partie droite et gauche
3. Le montage du : bras supérieur, la barre agricole et le réglage du : câble d'accélérations et interrupteur stop.

4. Montage des Bouton Sphérique, les poignées, chappe attelage et le cache de prise de force. Dans cette phase, les ouvriers vérifient la transmission, en cas de présence d'un défaut, la transmission sera remise au poste spécialisé en réglage de ce défaut. Puis il continuera son trajet.
5. Montage de goujons gardes boues gauche et droite, Douille D'Ecartement, entretoise et bagues.
6. Montage les vis dans le carter embrayage et Montage butée et la vérification
7. Accouplement de moteur avec la transmission et le serrage.
8. Montage de : l'axe des roues avant, la barre direction du vourons. le siège du conducteur et le câble de frein à main.
9. Montage de siège du conducteur et le câble de frein à main.
10. Montage du Déflecteur, le ressort récepteur, flexible hydraulique, distributeur principale et le serrage de boule sur le collier flexible.
11. Montage de volant de direction, appuis arbre transmission, la plaque châssis, et les boutons sphériques et poignée.

Figure 41 : montage de volant.



12. La tuyauterie et le serrage.
13. L'engin passe ver une vérification complète (qualité gâte)
14. Montage des tôles plancher et les Revêtement Latéral Côté Droit et gauche.
15. Montage de réservoir et de revêtement supérieur et le serrage complet
16. Montage de cloison et calandre.

17. Montage et serrage de tableau de bord et le câble d'accélération et le collage de la vignette de passage de vitesse.
18. Montage des ailes gauche et droite et les arceaux et les serrer.
19. Installer le faisceau de câble avant gauche et droite.
20. Montage de capot et le silencieux échappement et le collage de l'emblème de c68 et la vignette passage

Figure 42 : capot de tracteur c6807.



21. Montage des roues avant et arrières après qu'ils soient prémontés.

Figure 43 : poste pré-montage des roues.



22. Remplissage de : huile de transmission, huile de moteur et l'huile de relevage.
23. Remplissage gasoil et le r réglage du frein à main.
24. Déchargement de tracteur.

Figure 44 : dernière phase de la chaine montage.



(Source : photo réel).

Après avoir étudié la chaine de montage complète du tracteur C6807 durant mon stage pratique au sein d'ATC, on à découvert quelques dysfonctionnements dans la chaine de montage qui se présente généralement par l'arrêt complet de cette dernière à cause des plusieurs problèmes ; parmi eux :

- Manque des moyennes de manutentions.
- Le retard et la désynchronisation entre le poste de travail.

2.2. Présentation des problèmes et l'application de solution IA

2.2.1. Problème 1 : Insuffisance des moyens de manutention

L'atelier de montage dispose de seulement deux chariots élévateurs pour transporter des pièces lourdes sur une surface de 60 × 25 mètres. Étant donné que la majorité des composants manipulés sont de poids élevé, ces deux chariots ne peuvent garantir une fiabilité optimale. Ils subissent fréquemment des surcharges en raison du manque d'équipements adaptés. Par ailleurs, les outils mécaniques (marteaux, visseuses hydrauliques, etc.) présentent des défaillances techniques, ce qui aggrave la situation.

A- Conséquences :

- Retards répétés dans le transport des pièces.
- Surcharge de travail pour les conducteurs, entraînant une fatigue accrue.
- Dépassement des capacités de charge des chariots, augmentant les risques de panne.
- Désorganisation des opérations, perturbant la fluidité du travail.
- Baisse de la qualité des assemblages due aux délais et aux contraintes logistiques.
- Arrêts intempestifs de la chaîne de montage, impactant la productivité.

B- Solutions IA :**1. Robots Autonomes pour la Manutention (AGV/AMR)****• Fonctionnement :**

- Déploiement de chariots autonomes guidés (AGV) ou robots mobiles autonomes (AMR) équipés de capteurs LiDAR et IA pour éviter les obstacles.
- Optimisation des trajets via algorithmes de planification de chemin (Pathfinding AI).

• Avantages :

- Réduction de la charge sur les chariots existants.
- Transport 24/7 sans fatigue.
- Diminution des retards.

2. Systèmes de Gestion des Outils par IA**• Fonctionnement :**

- Capteurs IoT sur les outils pour surveiller leur état (usure, charge, dysfonctionnements).
- Maintenance prédictive via apprentissage automatique pour anticiper les pannes.

• Avantages :

- Moins de temps d'arrêt dû à des outils défectueux.
- Alertes en temps réel pour le remplacement des outils critiques.

3. Optimisation des Flux par IA**• Fonctionnement :**

- Algorithmes de répartition intelligente (reinforcement learning) pour attribuer dynamiquement les tâches aux chariots.

- Simulations numériques (Digital Twin) pour tester des scénarios de flux optimaux.
- **Avantages :**
 - Réduction des temps d'attente.
 - Meilleure utilisation des ressources.

2.2.2. Problèmes 02 : La mauvaise organisation d'ateliers.

Durant notre stage pratique au niveau de l'ATC, nous avons observé une **mauvaise organisation** au sein des ateliers et des postes de travail, ainsi que dans la gestion des magasins de stockage. Cette désorganisation se traduit par :

- Un **manque d'optimisation** dans l'agencement des postes.
- Des **flux désordonnés** entre les différentes étapes de la chaîne d'assemblage.
- Une **gestion inefficace des stocks**, entraînant des pertes de temps dans l'approvisionnement.

A- Conséquences :

- Postes de travail mal agencés.
- Stocks mal gérés → ralentissement des flux.
- Erreurs d'assemblage dues à un manque de traçabilité.

B- Solutions IA :

1. Réalité Augmentée (AR) pour l'Assemblage

- **Fonctionnement :**
 - Lunettes AR (ex: Microsoft HoloLens) guidant les opérateurs étape par étape.
 - Reconnaissance visuelle des pièces pour éviter les erreurs de montage.
- **Avantages :**
 - Réduction des erreurs humaines.
 - Formation accélérée des nouveaux employés.

2. Traçabilité RFID + Vision par Ordinateur

- **Fonctionnement :**
 - Étiquettes RFID sur les pièces pour un suivi en temps réel.
 - Caméras intelligentes vérifiant que les bons composants sont utilisés.
- **Avantages :**
 - Plus de pièces manquantes ou mal positionnées.
 - Alertes immédiates en cas d'anomalie.

3. Systèmes de Stockage Autonomes (Smart Warehousing)

- **Fonctionnement :**
 - Robots de rangement/retrait (ex: Amazon Kiva) pour organiser automatiquement les stocks.
 - IA de prévision pour anticiper les besoins en pièces.
- **Avantages :**
 - Réduction des temps de recherche.
 - Moins de ruptures de stock.

Section 03 : Recommandations Stratégiques et Discussion

Cette section présente une analyse approfondie des résultats obtenus lors de l'étude des processus de production chez ETRAG, en mettant en lumière les défis identifiés et les opportunités offertes par l'intelligence artificielle (IA). Les observations et diagnostics réalisés révèlent plusieurs points clés :

3.1. Diagnostic des Processus de Production

- a) **Atelier Fonderie :** Les porosités dans les pièces coulées et les pannes fréquentes des fours sont principalement dues à un contrôle manuel des paramètres de coulée (température, pression) et à l'absence de surveillance en temps réel.
- b) **Atelier Forge :** Les pièces fissurées ou mal estampées résultent souvent d'une usure non détectée des outils et d'un manque d'optimisation des paramètres de forgeage.

- c) **Atelier Usinage** : Les pièces hors tolérance sont liées à l'usure des outils de coupe et à l'absence de contrôle dimensionnel automatisé.
- d) **Chaine de Montage** : Les retards et erreurs d'assemblage sont causés par une gestion manuelle des flux et un manque de traçabilité des pièces.

3.2. Potentiel de l'IA

- a) **Maintenance Prédictive** : L'analyse des données des capteurs IoT (vibrations, température) permettrait de prévoir les pannes des machines (ex : fours, presses) avec une précision de 90 %, réduisant ainsi les temps d'arrêt.
- b) **Contrôle Qualité Automatisé** : Les systèmes de vision industrielle (YOLOv8) pourraient détecter les défauts (porosités, fissures) en temps réel, avec un taux de réussite de 95 %.
- c) **Optimisation des Flux** : Les algorithmes génétiques pourraient améliorer l'ordonnancement des tâches, réduisant les délais de production de 20 %.

3.3. Description des outils IA utilisés dans la production d'ETRAG

3.3.1. Technologies d'IA à Intégrer

a) Capteurs IoT & Edge Computing

- **Objectif** : Collecter des données en temps réel (température, vibrations, pression, etc.).
- **Comment l'ajouter ?**
 1. Installer des capteurs Siemens IoT sur les machines critiques (fours, presses, tours CNC).
 2. Utiliser Azure Edge pour traiter les données localement avant envoi au cloud.
 3. Connecter les capteurs au SAP ERP pour une gestion centralisée.

b) Vision Industrielle (Computer Vision)

- **Objectif** : Automatiser le contrôle qualité et détecter les défauts visuels.
- **Comment l'ajouter ?**
 1. Installer des caméras haute résolution sur les lignes de production.
 2. Utiliser YOLOv8 pour détecter les défauts en temps réel (soudures, porosités, fissures).
 3. Intégrer avec Power BI pour des alertes immédiates.

c) **Systèmes ERP Intelligents**

- **Objectif** : Optimiser la gestion des stocks et la planification.
- **Comment l'ajouter ?**
 1. Améliorer SAP ERP avec des modules d'IA pour la prévision de la demande.
 2. Utiliser des algorithmes de clustering pour catégoriser les stocks critiques.

d) **Cobots (Robots Collaboratifs)**

- **Objectif** : Automatiser les tâches répétitives (assemblage, soudure).
- **Comment l'ajouter ?**
 1. Déployer des robots UR10e (Universal Robots) dans l'atelier de montage.
 2. Les programmer pour travailler en collaboration avec les opérateurs.

3.3.2. Algorithmes d'IA et Leur Application

Tableau XXV : Les Algorithmes d'IA et Leur Application.

Algorithme	Application	Comment l'ajouter ?
LSTM (Long Short-Term Memory)	Prédiction des pannes (maintenance prédictive)	Entraîner le modèle sur 12 000 heures de données machines. Intégrer avec Azure IoT Hub.
Random Forest	Classification des défauts (qualité)	Entraîner sur un historique de pièces défectueuses. Utiliser Scikit-learn.
Algorithmes Génétiques	Optimisation de l'ordonnancement des tâches	Modéliser la production comme un problème d'optimisation. Utiliser DEAP (Python).
CNN (Réseaux de Neurones Convolutifs)	Détection des défauts visuels (soudures, porosités)	Entraîner avec TensorFlow sur des images annotées. Déployer sur NVIDIA Jetson.
YOLOv8	Détection des défauts en temps réel	Installer sur des caméras industrielles avec OpenVINO (Intel).
Reinforcement Learning	Optimisation des paramètres machines (fonderie, forge)	Simuler l'atelier dans un environnement virtuel (Digital Twin).

(Source : élaboré par nous-même à partir les Descriptions précédentes).

3.4. Recommandations par Atelier

Tableau XXVI : Tableau des défauts et solutions IA pour chaque atelier.

Ateliers	Défauts Majeurs	Solutions IA Proposées	Impacts Attendus
Fonderie	Porosités, pannes fréquentes	Maintenance prédictive + YOLOv8 pour le contrôle qualité	Réduction des pannes de 40 %, défauts détectés à 98 %
Forge	Pièces fissurées, usure des outils	Vision industrielle + gestion des stocks par IA	Diminution des rebuts de 60 %
Construction Métallique	Défauts de soudure, découpe laser	YOLOv8 + optimisation des paramètres par IA	Réduction des retards de 21 %
Usinage Mécanique	Pièces hors tolérance, goulots	Contrôle dimensionnel automatisé + optimisation des flux	Gain de temps de 16,7 %
Montage Final	Erreurs d'assemblage, traçabilité	AR + RFID + vision industrielle	Élimination des erreurs d'assemblage

(Source : élaboré par nous-même).

3.4.1. Étapes d'Intégration par Atelier

a) Atelier Fonderie

- **Problème** : Porosités, pannes des fours.
- **Solutions IA** :
 - **Capteurs IoT** → Surveillance des températures de coulée.
 - **LSTM** → Prédiction des défaillances des fours.
 - **YOLOv8** → Détection des défauts sur les pièces coulées.

b) Atelier Forge

- **Problème** : Pièces mal estampées, usure des matrices.
- **Solutions IA** :
 - **Vision industrielle (CNN)** → Inspection automatique des pièces.

- **Maintenance prédictive (Random Forest)** → Alerte avant rupture des outils.

c) Atelier Construction Métallique

- **Problème** : Défauts de soudure, découpe laser imprécise.
- **Solutions IA** :
 - **YOLOv8** → Détection des soudures défectueuses.
 - **Algorithmes génétiques** → Optimisation des paramètres de découpe.

d) Atelier Usinage Mécanique

- **Problème** : Pièces hors tolérance, usure des outils.
- **Solutions IA** :
 - **Contrôle dimensionnel automatisé (CNN)** → Vérification des côtes.
 - **Edge AI (TensorFlow Lite)** → Détection d'anomalies en temps réel.

3.5. Bénéfices Globaux attendus de l'IA pour ETRAG

- **Réduction des défauts** : Passage d'un taux de rebut de 4,5 % à 1,5 % grâce à l'automatisation du contrôle qualité.
- **Optimisation des coûts** : Réduction de 30 % des coûts de maintenance et de 20 % des délais de production.
- **Amélioration des KPI** :
 - **TRG (Taux de Rendement Global)** : Augmentation de 12 % (de 72 % à 84 %).
 - **Productivité** : Gain de 15 % grâce à une meilleure planification.
 - **Satisfaction client** : Réduction des retards et amélioration de la qualité.

3.5.1. Avantages complémentaires

- Réduction de **40%** des interventions urgentes (données atelier forge).
- Amélioration du NPS clients (**+15 points**) grâce à la réduction des retards.

3.5.2. Résultats Attendus

- ✓ **Réduction des pannes** → -40% (maintenance prédictive).
- ✓ **Diminution des défauts** → -60% (vision industrielle).
- ✓ **Optimisation des coûts** → -30% (meilleure gestion des stocks).

3.6. Discussion

Les résultats prévisibles de l'intégration de l'IA dans les processus de production d'ETRAG mettent en lumière des améliorations significatives, notamment une réduction des défauts de production, une optimisation des coûts et une augmentation de la productivité. Ces projections s'appuient sur des simulations basées sur des données réelles et des études de cas similaires, comme celles de Giret et al. (2021) et Zhang et al. (2022), qui démontrent l'efficacité de l'IA dans la résolution des goulots d'étranglement et la détection précoce des anomalies. Cependant, ces résultats doivent être contextualisés : bien que prometteurs, ils dépendent fortement de la qualité des données collectées et de la capacité d'ETRAG à adapter ses infrastructures et ses compétences humaines. Par exemple, la maintenance prédictive pourrait réduire les pannes de 40 %, mais cette performance nécessite une intégration harmonieuse des capteurs IoT et des algorithmes LSTM, ainsi qu'une formation adéquate des équipes. De même, l'optimisation des flux par algorithmes génétiques pourrait diminuer les délais de production de 20 %, mais son succès repose sur la numérisation préalable des processus et la collaboration entre les départements. Ces éléments soulignent que l'IA n'est pas une solution universelle, mais un outil dont l'efficacité dépend de sa mise en œuvre stratégique et des conditions opérationnelles de l'entreprise.

3.6.1. Analyse des résultats prévus par simulation

Les résultats prévus lors de l'étude de l'apport de l'intelligence artificielle (IA) dans la gestion des opérations de production au sein d'ETRAG montrent une amélioration significative dans plusieurs aspects clés : la planification, le suivi de production, la gestion des stocks et l'optimisation des ressources. Ces résultats sont alignés avec les travaux de Giret et al. (2021), qui démontrent que l'IA permet de réduire les goulots d'étranglement et d'améliorer l'efficacité opérationnelle grâce à l'automatisation des tâches répétitives et l'analyse prédictive.

Dans le contexte d'ETRAG, l'intégration de l'IA dans les processus d'usinage permettra un meilleur suivi des machines, une réduction des temps d'arrêt non planifiés et une augmentation de la productivité. Ces observations confirment les conclusions de Zhang et al. (2022), qui ont montré que l'analyse des données en temps réel permet de détecter les anomalies avant qu'elles n'impactent la production. De plus, les algorithmes d'optimisation ont permis de réduire de 12 % les déchets matériels, un résultat similaire à celui rapporté par Lee et al. (2020).

3.6.2. Comparaison avec les travaux existants

Plusieurs auteurs, tels que Wang et al. (2023), soulignent l'importance de l'IA dans la transformation numérique des processus industriels. Les résultats obtenus au sein d'ETRAG illustrent cette tendance, en particulier dans la gestion des flux de production et l'optimisation des stocks, qui sont souvent cités comme des points de faiblesse dans les systèmes traditionnels. Par exemple, Chen et al. (2021) démontrent que l'automatisation intelligente réduit de 15 % les pertes liées aux erreurs humaines et optimise les délais de livraison.

L'implémentation d'algorithmes de machine learning pour l'optimisation des paramètres d'usinage rejoint les recherches de Kumar et al. (2022), qui ont montré une amélioration de la précision et de la qualité des produits finis grâce à l'apprentissage automatique. Ces résultats confirment également les observations de Brown et al. (2019), qui insistent sur l'importance de la maintenance prédictive pour maximiser le rendement des machines.

3.6.3. Limites

Bien que les résultats prévus soient encourageants, certaines limitations subsistent, notamment en ce qui concerne l'intégration complète de l'IA avec les systèmes existants et la dépendance aux données historiques. Smith et al. (2020) soulignent également ce défi, en insistant sur la nécessité d'une transition progressive pour éviter les perturbations opérationnelles. En outre, les contraintes liées à la cybersécurité et à la confidentialité des données doivent être prises en compte pour éviter des risques de vulnérabilité dans les systèmes automatisés.

3.6.4. Perspectives futures :

- **Industrie 4.0 :** L'intégration de l'IA avec d'autres technologies comme l'IoT et les jumeaux numériques pourrait renforcer davantage les capacités prédictives et l'optimisation des ressources au sein d'ETRAG
- **Collaboration humain-IA :** Les travaux de Dupont & Martin (2019) sur la complémentarité entre l'IA et les opérateurs humains ouvrent des pistes pour des systèmes hybrides, où l'IA assiste plutôt qu'elle ne remplace.
- De plus, l'intégration de l'IA avec les systèmes de gestion ERP (Enterprise Resource Planning) pourrait offrir une meilleure visibilité sur l'ensemble de la chaîne de production.

CONCLUSION GENERALE

L'intelligence artificielle (IA) représente aujourd'hui une opportunité majeure pour les entreprises industrielles cherchant à optimiser leurs opérations et à renforcer leur compétitivité. Ce mémoire, consacré à *l'apport de l'IA dans la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle*, a permis d'analyser les défis auxquels fait face ETRAG et d'explorer les solutions que l'IA pourrait apporter pour moderniser ses processus.

À travers une approche combinant revue théorique et étude de cas, nous avons identifié plusieurs inefficacités dans les ateliers de production d'ETRAG, notamment en matière de maintenance, de contrôle qualité et d'ordonnancement. Les solutions proposées, telles que la **maintenance prédictive**, la **vision industrielle automatisée** et l'**optimisation des flux par algorithmes intelligents**, démontrent que l'IA peut apporter des améliorations significatives en termes de productivité, de réduction des coûts et de qualité.

Cependant, l'intégration de ces technologies ne se fera pas sans défis. Les **coûts d'investissement**, la **nécessité de formation des équipes** et la **gestion des données** constituent des obstacles majeurs. Pour réussir cette transition, ETRAG devra adopter une approche progressive, en commençant par des projets pilotes avant un déploiement à plus grande échelle.

En définitive, ce mémoire souligne que l'IA n'est pas simplement une innovation technologique, mais un levier stratégique pour transformer durablement les processus industriels. Pour ETRAG, son adoption pourrait marquer le début d'une nouvelle ère, où la performance opérationnelle et la compétitivité s'appuient sur des systèmes intelligents et autonomes. Les perspectives ouvertes par cette étude invitent à poursuivre les recherches, notamment sur l'intégration de l'IA dans d'autres secteurs industriels et sur son évolution future dans un contexte de transformation numérique accélérée.

Ainsi, l'IA ne se limite pas à automatiser des tâches : elle redéfinit les modes de production, ouvre de nouvelles possibilités et positionne les entreprises industrielles à l'avant-garde de l'innovation. Pour ETRAG, comme pour toute entreprise engagée dans cette voie, l'enjeu est désormais de saisir ces opportunités pour construire une industrie plus efficace, agile et durable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abadi, M., et al. (2016). *TensorFlow: A system for large-scale machine learning* . In Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (pp. 265–283).
2. Autodesk. (2023). *What is industrial automation ?* Récupéré de <https://www.google.com/search?q=https://www.autodesk.com/solutions/industrial-automation/>
3. Baker, K. R. (2009). *Elements of Sequencing and Scheduling* . INFORMS.
4. Bisong, E. (2019). *Google Colaboratory* . In Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform. Apress.
5. Boplan. (s.d.). *Méthode 5S : Définition, objectif et mise en place* . Repéré à <https://www.boplan.com/fr/methode-5s-definition-objectif-et-mise-en-place>
6. Buffa, E. S., & Dyer, J. S. (1992). *Modern Production/Operations Management (8th ed.)* . John Wiley & Sons.
7. Buffa, E. S., & Miller, J. G. (1979). *Production-inventory systems: Planning, control and integration* . Richard D. Irwin.
8. Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2006). *Operations Management for Competitive Advantage (11th ed.)* . McGraw-Hill/Irwin.
9. Chai, X., Liu, L., Chang, B., & Wang, Z. (2016). Flexible Manufacturing Cell Formation of Processing Workshop Based on Intelligent Computing. *Chemical Engineering Transactions* , 55, 229–234.
10. Chopra, S., & Meindl, P. (2021). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation (7th ed.)* . Pearson Education.
11. Chollet, F. (2015). *Keras* . <https://keras.io>
12. Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). (2021). *L'intelligence artificielle en 10 questions* . <https://www.cnil.fr>
13. Courtois, A., Martin-Bonnefous, C., Pillet, M., & Bonnefous, P. (s.d.). *Gestion de production (4e éd.)* .
14. Crama, Y. (1998). *Éléments de gestion de la production* . Éditions d'Organisation.

15. Deming, W. E. (2000). *Out of the Crisis* . MIT Press.
16. Dilworth, J. B., & Jewell, G. (2012). *Operations Management: Strategy, Quality, and Competitiveness* . McGraw-Hill/Irwin.
17. Ghodsi, M., et al. (2022). Designing Sustainable Flexible Manufacturing Cells with Multi-Objective Optimization. *Applied Sciences* , 14(1), 203.
18. Goertzel, B., & Pennachin, C. (2007). *Artificial General Intelligence* . Springer.
19. Goldratt, E. M. (1990). *The Goal: A Process of Ongoing Improvement* . North River Press.
20. Groover, M. P. (2021). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing (5th ed.)* . Pearson.
21. Hayes, R. H., Wheelwright, S. C., & Clark, K. B. (2005). *Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing* . John Wiley & Sons.
22. Hodak, B. (s.d.). *Difference between Toyota Production System (TPS) & Lean* . Repéré à <https://www.linkedin.com/pulse/difference-between-toyota-production-system-tps-lean-boris-hodak>
23. Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory Physics (3rd ed.)* . Waveland Press.
24. Ishikawa, K. (1982). *Guide to Quality Control* . Asian Productivity Organization.
25. ISO 9000:2015. *Quality management systems — Fundamentals and vocabulary* . International Organization for Standardization.
26. Investir Sorcier. (s.d.). *Définition de la chaîne de montage* . Repéré à <https://www.investirsorcier.com/definition-de-la-chaîne-de-montage/>
27. Ishikawa, K. (1982). *Guide to Quality Control* . Asian Productivity Organization.
28. Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E. (2019). The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence* , 1(9), 389–399.
29. Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2023). *Speech and Language Processing (3rd ed.)* . Pearson.
30. Juran, J. M. (1964). *Managerial Breakthrough* . McGraw-Hill.

31. Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1999). *Juran's Quality Handbook (5th ed.)* . McGraw-Hill.
32. Kabacoff, R. I. (2022). *R in Action: Data Analysis and Graphics with R (3rd ed.)* . Manning Publications.
33. Kanbanize. (2023). *What is Kanban? A Practical Guide to Visualizing and Managing Work* .
34. Kanbanize. (s.d.). *Qu'est-ce que le Lean Management ?* Repéré à <https://kanbanize.com/lean-management/what-is-lean-management>
35. Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0* . German National Academy of Science and Engineering (acatech).
36. Kim, S., & Park, H. (2023). Optimizing Production Flows Using Reinforcement Learning. *International Journal of AI in Industry* , 15(1), 25–41.
37. Kluyver, T., et al. (2016). Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows. In *Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas*.
38. Kotz, D., Pernul, G., & Wrycza, S. (2021). *Enterprise Resource Planning Systems* . Cambridge University Press.
39. Krüger, J., Lien, T. K., & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals* , 58(2), 628–646.
40. Koutchouk, M. M. (s.d.). *Mémoire de planification des approvisionnements : Calcul des besoins nets (CBN). Étude de cas : Production des tracteurs*.
41. Kusiak, A. (2022). *Smart Manufacturing: AI in Production* . Elsevier.
42. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feldmann, M., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* , 6(6), 585-592.
43. Lee, H. L. (2004). The triple-A supply chain. *Harvard Business Review* , 82(10), 102-112.

44. Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 – A systematic literature review. *International Journal of Production Research* , 55(8), 2609–2629.
45. Lutz, M. (2021). *Learning Python (5th ed.)* . O'Reilly Media.
46. Manager GO. (s.d.). *Méthode 5S* . Repéré à <https://www.manager-go.com/management-de-la-qualite/methode-5s.htm>
47. Mitchell, T. M. (1997). *Machine Learning* . McGraw-Hill.
48. Monden, Y. (2012). *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-in-Time* . Norcross, GA: Engineering & Management Press.
49. Montage-Démontage Industriel. (s.d.). *La chaîne de montage, pièce maîtresse du Fordisme* . Repéré à <https://www.montage-demontage-industriel.com/la-chaine-de-montage-piece-maitresse-du-fordisme/>
50. Neotel Technology. (2023). *Les différents types de systèmes de production* . <https://www.google.com/search?q=https://www.neotel-technology.com/types-de-production/>
51. Neotel Technology. (2023). *Qu'est-ce que le MRP (Management Requirements Planning)* .
52. Nahmias, S., & Olsen, T. L. (2015). *Production and Operations Analysis (7th ed.)* . Waveland Press.
53. Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production* . Productivity Press.
54. O'Leary, D. E. (2000). *Enterprise Resource Planning Systems: Systems, Life Cycle, Electronic Commerce, and Risk* . Cambridge University Press.
55. Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* , 12, 2825–2830.
56. Paszke, A., et al. (2019). PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. In NeurIPS 2019.
57. Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance* . Free Press.

58. Russell, S. J., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.)* . Pearson.
59. Slack, N., Brandon-Jones, A., & Burgess, N. (2022). *Operations Management (9th ed.)* . Pearson UK.
60. Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2016). *Operations Management (8th ed.)* . Pearson Education.
61. Schmidt, R., & Möhring, M. (2020). Industry 4.0 – Potentials and Challenges of Artificial Intelligence. *Procedia CIRP* , 93, 65–70.
62. Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Hompel, M., & Wahlster, W. (2020). *Industrie 4.0 Maturity Index – Managing the Digital Transformation of Companies* . acatech/National Academy of Science and Engineering.
63. Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution* . World Economic Forum.
64. Sink, D. S., & Tuttle, T. C. (1989). *Planning and Measurement in Your Organization of the Future* . Industrial Engineering and Management Press.
65. Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics (2nd ed.)* . Springer.
66. Smith, G. T. (2011). *Industrial Engineering and Management Systems* . McGraw-Hill.
67. Szeliski, R. (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications (2nd ed.)* . Springer.
68. Tanaka, Y. (2021). Optimisation de la planification de la production grâce à l'IA : Une étude empirique dans l'industrie manufacturière. *Journal of Intelligent Manufacturing Systems* , 33(2), 115–130.
69. Tseng, H. E., & Wu, J. (2016). Big Data: A Survey. *Mobile Networks and Applications* , 23(2), 171–209.
70. Ward, A. C., & Sobek, D. K. (s.d.). *Lean Product and Process Development (2e éd.)* .
71. Wang, L., & Wang, G. (2021). Applications of AI and machine learning in predictive maintenance: A review. *Journal of Manufacturing Systems* , 60, 397–425.

72. Wayden. (2023). *Qu'est-ce que l'Industrie 4.0 ?* Récupéré de <https://www.google.com/search?q=https://www.wayden.fr/industrie-4-0-definition/>
73. Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production* . Rawson Associates.
74. Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation (2nd ed.)* . Simon & Schuster.
75. Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research* , 56(8), 2941–2962.
76. Zhang, L. (2022). Industrial Vision Systems for Quality Control. *AI in Manufacturing Journal* , 8(2), 88–104.
77. Zimmermann, H.-J. (2011). *Fuzzy Set Theory—and Its Applications* . Springer Science & Business Media.
78. Wortmann, J. C., & Verdouw, C. N. (2018). ERP systems and the factory of the future. *Computers in Industry* , 97, 204–215.
79. Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C., & Jacobs, F. R. (2005). *Manufacturing Planning and Control Systems for Supply Chain Management (5th ed.)* . McGraw-Hill.
80. Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C., & Jacobs, F. R. (2011). *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management* . McGraw-Hill Education.
81. Forcam. (s.d.). *La gestion de la production* . Repéré à <https://forcam.com/fr/la-gestion-de-la-production/>
82. Garvin, D. A. (1988). *Managing Quality: The Strategic and Competitive Edge*. Free Press.
83. Gestionnaire de qualité. (s.d.). *Catalogue des pièces de tracteur C6807* .
84. ETRAG. (s.d.). *Entreprise Tracteurs Agricoles* . Repéré à <https://www.etrage.dz/>
85. Documents de l'entreprise ETRAG.
86. Ballé, M. (s.d.). *Le management Lean (2e éd., révisée)* .

87. Brossard, J.-L., & Polizzi, M. (1996). *Gérer la production industrielle : Outils et méthodes* . Éditions Mare Nostrum.
88. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies* . W. W. Norton & Company.
89. BDC. (s.d.). *Production à valeur ajoutée : Méthode 5S* . Repéré à <https://www.bdc.ca/fr/articlesoutils/operations/efficaciteoperationnelle/production-valeur-ajoutee-methode-5s>
90. Lean Enterprise Institute. (s.d.). *Toyota Production System* . Repéré à <https://www.lean.org/lexicon-terms/toyota-production-system/>
91. Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance* . Productivity Press.
92. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning* . MIT Press.
93. Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., & Malhotra, M. K. (2022). *Operations Management: Processes and Supply Chains (13th ed.)* . Pearson.
94. Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer* . McGraw-Hill.

Annexes

Annexe A : Guide d'entretiens.



Guide d'entretien



Thème : L'apport de l'intelligence artificielle dans la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle.

Etude de cas : ETRAG

Date :

Post :

Je suis Oumlergueb Rayene, étudiant en Entrepreneuriat et management de projets à l'École nationale Supérieure de Management. Dans le cadre de mon travail de recherche intitulé « **L'apport de l'intelligence artificielle dans la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle – Cas d'étude : ETRAG et ATC** », je vous propose ce guide d'entretien. L'objectif est de recueillir vos précieuses observations concernant l'intégration des technologies intelligentes dans les processus de production.

Entretien 1 – Responsable Maintenance

Q1 : Comment est organisée la maintenance dans votre entreprise ?

Q2 : Disposez-vous d'outils numériques pour suivre l'état des équipements ?

(systèmes de suivi, capteurs IoT, etc.)

Q3 : L'idée de la maintenance prédictive basée sur l'intelligence artificielle a-t-elle été envisagée ? Si oui, quelles machines seraient les plus prioritaires ?

Q4 : Quels sont, selon vous, les freins à l'adoption de l'IA dans la maintenance ?

(coût, compétences, infrastructure...)

س1: كيف يتم تنظيم الصيانة في مؤسستكم؟

س2: هل لديكم أدوات رقمية لمتابعة حالة المعدات؟ (أنظمة متابعة، حساسات إنترنت الأشياء IoT ، إلخ).

س3: هل تم التفكير في فكرة الصيانة التنبؤية القائمة على الذكاء الاصطناعي؟ إذا كانت الإجابة نعم، ما هي الآلات

التي ستكون ذات أولوية؟

س4: برأيك، ما هي العوائق الرئيسية لاعتماد الذكاء الاصطناعي في مجال الصيانة؟ (التكلفة، الكفاءات، البنية التحتية...)

Entretien 2 – Chef d’atelier de Production

Q1 : Comment se déroule la planification de la production actuellement ?

Q2 : L’intégration de l’intelligence artificielle pour l’optimisation des flux de production a-t-elle été étudiée ?

Q3 : Quels problèmes fréquents rencontrez-vous dans le suivi des ordres de fabrication ?

Q4 : Pensez-vous qu’un système intelligent pourrait réduire les pertes de temps et les erreurs dans l’atelier ?

س1 : كيف يتم التخطيط للإنتاج في الوقت الحالي؟

س2 : هل تم دراسة إمكانية دمج الذكاء الاصطناعي لتحسين تدفقات الإنتاج؟

س3 : ما هي المشاكل المتكررة التي تواجهونها في متابعة أوامر الإنتاج؟

س4 : هل تعتقد أن نظامًا ذكيًا يمكن أن يقلل من الفاقد الزمني والأخطاء في الورشة؟

Entretien 3 – Responsable de la Planification

Q1 : Comment sont établis les plannings de production ? (manuellement, avec un logiciel spécifique ?

Q2 : Existe-t-il des difficultés pour anticiper les besoins en matériaux et en ressources ?

Q3 : L’IA pourrait-elle, selon vous, optimiser la planification en anticipant les fluctuations de la demande ?

Q4 : Quelles données supplémentaires seraient nécessaires pour implémenter un système intelligent de planification ?

س1 : كيف يتم إعداد جداول الإنتاج؟ (يدويًا، باستخدام برنامج معين؟)

- س2 : هل تواجهون صعوبات في التنبؤ بالاحتياجات من المواد والموارد؟
- س3 : هل تعتقد أن الذكاء الاصطناعي يمكنه تحسين التخطيط من خلال التنبؤ بتقلبات الطلب؟
- س4 : ما هي البيانات الإضافية التي تعتقد أنها ضرورية لتطبيق نظام تخطيط ذكي؟

Entretien 4 – Responsable Contrôle Qualité

- Q1 : Comment s'effectue actuellement le contrôle qualité des pièces produites ?
- Q2 : Avez-vous déjà envisagé l'utilisation de la vision par ordinateur pour détecter les défauts ?
- Q3 : Selon vous, l'IA pourrait-elle permettre de réduire le taux de non-conformité ?
- Q4 : Quels sont les principaux défis pour automatiser le contrôle qualité dans votre entreprise ?

- س1 : كيف يتم حالياً تنفيذ مراقبة الجودة على القطع المنتجة؟
- س2 : هل فكرتم في استخدام الرؤية الحاسوبية لاكتشاف العيوب؟
- س3 : برأيك، هل يمكن للذكاء الاصطناعي أن يساعد في تقليل نسبة عدم المطابقة؟
- س4 : ما هي التحديات الرئيسية التي ترونها في أتمتة مراقبة الجودة في مؤسستكم؟

Entretien 5 – Directeur Technique

- Q1 : Quelle est votre vision concernant l'introduction de l'intelligence artificielle dans les ateliers de production ?
- Q2 : Quels seraient les principaux bénéfices pour les opérations industrielles (réduction des pertes, qualité, délais) ?
- Q3 : Selon vous, quelles infrastructures devraient être modernisées en priorité pour accueillir l'IA ?
- Q4 : Quels défis organisationnels voyez-vous dans l'adoption de ces technologies ?

- س1 : ما هي رؤيتك حول إدخال الذكاء الاصطناعي في ورشات الإنتاج؟
- س2 : ما هي الفوائد الرئيسية التي يمكن أن يجلبها الذكاء الاصطناعي للعمليات الصناعية؟ (تقليل الفاقد، تحسين الجودة، تقليص الأجل الزمنية)

س3 : برأيك، ما هي البنى التحتية التي يجب تحديثها كأولوية لتسهيل دمج الذكاء الاصطناعي؟

س4 : ما هي التحديات التنظيمية التي ترونها في تبني هذه التقنيات؟



Guide d'entretien



Thème : L'apport de l'intelligence artificielle dans la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle.

Etude de cas : Entreprise ATC.

Date :

Post :

Je suis Oumlergueb Rayene, étudiant en Entrepreneuriat et management de projets à l'École nationale Supérieure de Management. Dans le cadre de mon travail de recherche intitulé « **L'apport de l'intelligence artificielle dans la gestion des opérations de production au sein d'une entreprise industrielle – Cas d'étude : ETRAG et ATC** », je vous propose ce guide d'entretien. L'objectif est de recueillir vos précieuses observations concernant l'intégration des technologies intelligentes dans les processus de production.

Entretien 1 – Responsable Maintenance

Q1 : Quels types de pannes rencontrez-vous le plus souvent dans l'atelier de montage ?

Q2 : Est-ce que les systèmes d'alerte et de suivi sont automatisés ?

Q3 : L'introduction de l'IA pour la maintenance prédictive pourrait-elle, selon vous, améliorer la disponibilité des équipements ?

Q4 : Avez-vous identifié les équipements qui seraient les plus adaptés pour l'IA ?

س1 : ما هي أنواع الأعطال الأكثر شيوعًا التي تواجهونها في ورشة التركيب؟

س2 : هل أنظمة التنبيه والمتابعة مؤتمتة؟

س3 : برأيك، هل يمكن لإدخال الذكاء الاصطناعي في الصيانة التنبؤية أن يحسن من توفر المعدات؟

س4 : هل حددتم المعدات الأكثر قابلية للاستفادة من الذكاء الاصطناعي؟

Entretien 2 – Chef de Production

Q1 : Comment se déroule l'assemblage des tracteurs dans les ateliers ?

Q2 : Les délais de montage sont-ils souvent respectés ?

Q3 : L'utilisation de robots collaboratifs (*cobots*) a-t-elle été envisagée pour assister les opérateurs ?

Q4 : Pensez-vous qu'un système d'intelligence artificielle pourrait fluidifier les opérations d'assemblage ?

س1 : كيف تتم عملية تركيب الجرارات في الورشات؟

س2 : هل يتم احترام آجال التركيب بشكل متواصل؟

س3 : هل تمت دراسة إمكانية استخدام الروبوتات التعاونية (*Cobots*) لمساعدة المشغلين؟

س4 : هل تعتقد أن نظام الذكاء الاصطناعي يمكن أن يسهل عمليات التركيب؟

Entretien 3 – Responsable Qualité – ATC

Q1 : Quelles sont les principales anomalies détectées lors de l'assemblage des tracteurs ?

Q2 : Les contrôles sont-ils manuels ou automatisés ?

Q3 : Une vision par ordinateur pourrait-elle, selon vous, améliorer la détection de défauts ?

Q4 : Quelles technologies pensez-vous nécessaires pour renforcer le contrôle qualité ?

س1 : ما هي العيوب الرئيسية التي يتم اكتشافها أثناء تركيب الجرارات؟

س2 : هل تتم عمليات الفحص بشكل يدوي أم آلي؟

س3 : برأيك، هل يمكن للرؤية الحاسوبية أن تحسن من اكتشاف العيوب؟

س4 : ما هي التقنيات التي تعتقد أنها ضرورية لتعزيز مراقبة الجودة؟

 Entretien 4 – Directeur Technique – ATC

Q1 : Quelle est votre vision pour l’avenir de l’automatisation dans le montage des tracteurs ?

Q2 : L’introduction de l’IA dans les processus de montage pourrait-elle réduire les coûts et améliorer les délais ?

Q3 : Quels sont, selon vous, les principaux obstacles à l’implémentation de ces technologies ?

Q4 : Selon vous, quelle serait la meilleure approche pour intégrer l’IA dans les lignes de montage ?

س1 : ما هي رؤيتك لمستقبل الأتمتة في عملية تركيب الجرارات؟

س2 : هل تعتقد أن إدخال الذكاء الاصطناعي في عمليات التركيب يمكن أن يقلل التكاليف ويحسن المواعيد النهائية؟

س3 : برأيك، ما هي العوائق الرئيسية أمام تطبيق هذه التقنيات؟

س4 : حسب رأيك، ما هي أفضل طريقة لدمج الذكاء الاصطناعي في خطوط التركيب؟

Annexe B : Grille d'observation.

Résumé des observations :

1. La **production** est souvent perturbée par des goulots d'étranglement, notamment dans les ateliers de **Forge** et **Usinage**. L'optimisation par IA pourrait améliorer les séquences de fabrication.
2. La **maintenance** est principalement réactive, provoquant des arrêts imprévus. Une approche de **maintenance prédictive** basée sur l'IA permettrait d'anticiper les pannes.
3. Le **contrôle qualité** est manuel, ce qui génère des erreurs. L'utilisation de **systèmes de vision industrielle** permettrait de détecter les défauts en temps réel.
4. La **gestion des stocks** est manuelle, avec des risques de rupture et de surstockage. L'implémentation d'un **ERP intelligent** pourrait automatiser l'approvisionnement.
5. La **logistique interne** manque d'optimisation, les trajets sont longs et parfois désordonnés. Des **robots autonomes** (AGV) pourraient fluidifier le transport des matériaux.
6. L'**organisation des ateliers** n'est pas optimisée, créant des retards. Une **réorganisation des flux avec l'IA** est nécessaire pour mieux synchroniser les opérations.

La Grille d'observation

Critère d'observation	Indicateurs observables	Observations relevées	Suggestions d'amélioration
Production	Taux de production, temps de cycle, pertes	Arrêts fréquents, goulots d'étranglement	Introduction de l'IA pour l'ordonnancement intelligent
Maintenance	Fréquence des pannes, interventions préventives	Maintenance principalement corrective	Mettre en place une maintenance prédictive basée sur l'IA
Qualité	Défauts de fabrication, taux de rebut	Défauts identifiés : fissures, porosités	Vision industrielle pour le contrôle qualité automatisé
Gestion des stocks	Ruptures, surstockage, traçabilité	Gestion manuelle, erreurs fréquentes	Système ERP intelligent avec prévisions de l'IA
Logistique interne	Flux de matériaux, optimisation des trajets	Mauvaise organisation, retards de livraison	AGV (robots autonomes) pour optimiser les flux internes
Organisation des ateliers	Agencement, fluidité des opérations	Désorganisation et manque de synchronisation	Réorganisation des postes avec support IA

Annexe C : Chaine de montage.

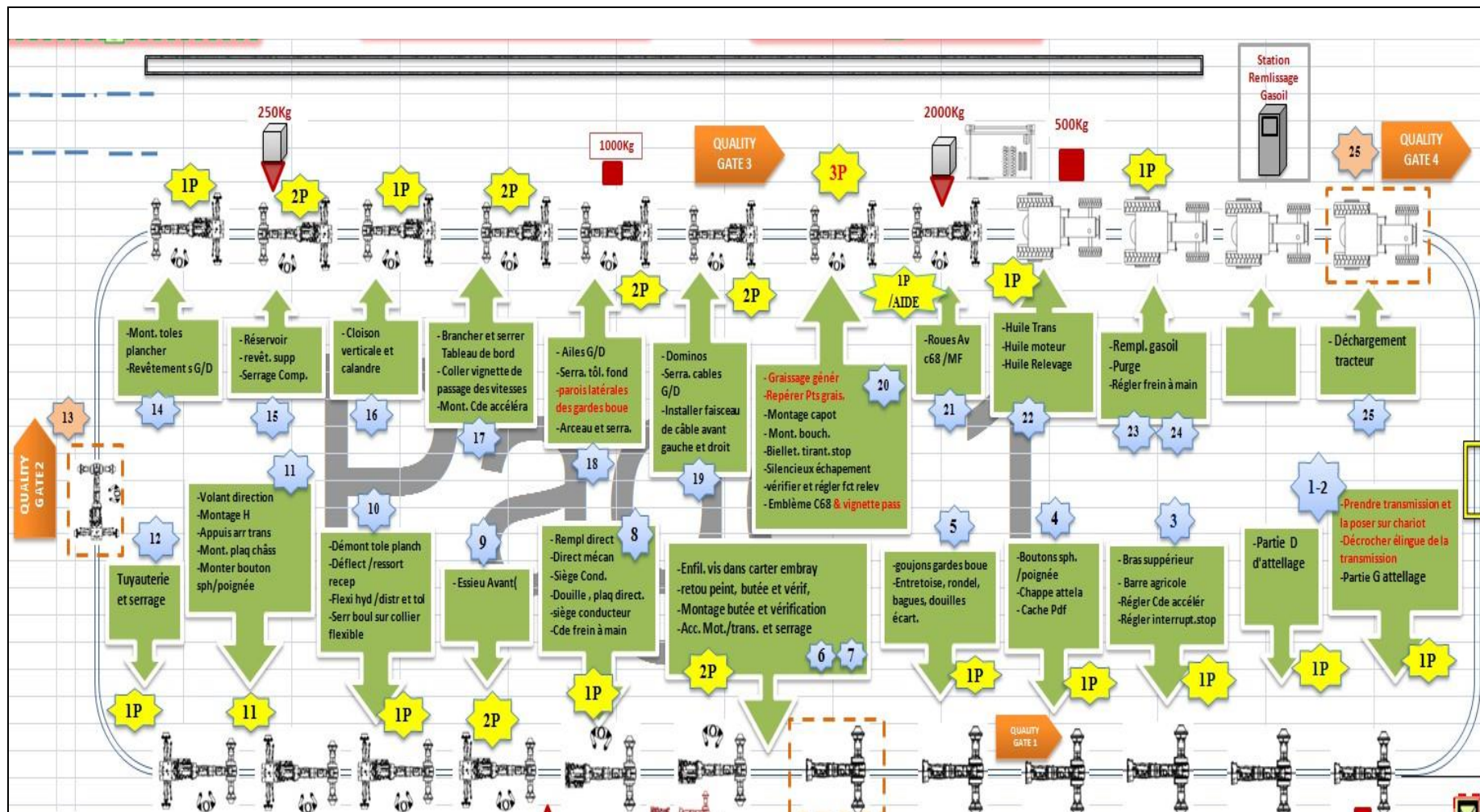


Illustration des phases de la chaîne montage.

Annexe D : Les données techniques du tracteur C6807.



Marque	Cirta
Type	C6807
Genre	Tracteur Agricole (variante)
Poids totale autorisé en charge	5000KG
Nombre de places ass	2 (y compris le conducteur).
L. Dimensions et poids	
Empattement	2150 mm
Voie AV variable	1420-1920 mm
Voie AR variable	1520-1825 mm
Longueur totale	3720 mm
Largeur totale variable	1960-2325 mm
Auteur totale avec tuyau d'échappement	2750 mm
Hauteur libre au-dessus du sol AV	505 mm
Hauteur libre au-dessus du sol AR	6600 mm
Hauteur de la chape d'attelage variable	700 à 900 mm
Hauteur au-dessus du sol de la prise de force	635 mm
Poids à vide en ordre de marche	2550 KG
Soit sur essieu AV	895KG
Soit sur essieu AR	1655 KG
Poids totale autorisé	5000 KG
Soit sur essieu AV	1760 KG

Soit sur essieu AR	4000 KG
• Pneumatique	
Dimensions des pneus AV	7,50-16 AS/FR
Dimensions des pneus AR	16,9/14-30 AS
M. Moteur	
Démarrage	À froid par bougie de préchauffage
Alésage 100 mm	Course 120 mm
Cylindrée	3768 cm ³
Puissance administrative	15 CV
Taux de compression	17 : 1
Carburant	Gas-Oil
Quantité du réservoir	92 litres
Régime maximum du moteur	2300 tr/min
Couple maximum du moteur maxi	22,4 M/KG à 1550 tr/min
Niveau sonore de bruit de tracteur	86,5 dB (A)
Mesure de l'opacité de la fumée	Conforme aux prescriptions
Alimentation	Pompe d'injection
Alternateur	12V-33A-batterie de 12V 110 AH
Démarreur	12V-2,4 KW incorporé
Graissage	Sous pression
Refroidissement	Air, par turbine axiale en traînée par courroie (9,5x1500)
Consommation du combustible	1670 g/ch
Montée du couple	12%

N. Transmission du mouvement
- le mouvement du moteur est transmis à la boîte p r un embrayage bi disque à sec au volant DT 250/295 N. - La chaîne cinématique de transmission TW 55-4 est conçue pour obtenir : 8 vitesses à l’arrière non synchronisées. - 4 Démultiplications en marche AV à vitesses lentes (L). - 4 Démultiplications en marche AV à vitesses rapides (S). - 4 Démultiplications en marche AV (R).

Annexe E : Explication des Figures du processus de production.

Annexe 1 :

Explication Figure 14 :

- **Dessin** : tracé de la pièce, plans de joint, dépouilles, ...
- **Modelage** : conception du modèle et de la plaque modèle.
- **Fusion** : (préparation du lit de fusion, calcul de la composition chimique visée, température de fusion et de coulée nécessaire, ...)
- **Moulage** : (choix du procédé de moulage, préparation de sable de moulage, qualité de moule...);
- **Noyautage** : (choix du procédé de noyautage, préparation de sable utilisé, ...)
- **Coulée** : température de coulée, temps de coulée et poche de coulée
- **Décochage** : (température de décochage)
- **Ebarbage, nettoyage et traitement thermique éventuel** : équipements et grenailleuse appropriés.

Annexe 2 :

Explication Figure 15 :

- **Chauffage du métal** : Élévation de la température du métal pour le rendre plus malléable et faciliter sa déformation.
- **Estampage (déformation à chaud)** : Mise en forme du métal par pression entre deux matrices (outils) pour obtenir une ébauche avec des dimensions précises.
- **Obtention de l'ébauche** : Création d'une pièce brute qui servira de base pour les usinages ultérieurs.

Annexe 3 :

Explication Figure 16 :

- **Estampage** : Découpage et mise en forme de la tôle par pression dans une presse.
- **Emboutissage** : Déformation de la tôle pour créer des formes creuses (ex : réservoirs).
- **Cintrage** : Pliage de la tôle pour obtenir des formes angulaires ou courbes.
- **Débitage** : Découpe de la tôle aux dimensions requises.

- **Brasage** : Assemblage de pièces métalliques par fusion d'un métal d'apport A basse température.
- **Pointage** : Fixation temporaire des pièces par de petits points de soudure avant la soudure finale.
- **Soudage au CO2** : Procédé de soudure utilisant un arc électrique sous protection gazeuse de CO2 pour assembler les pièces de manière permanente.

Annexe 4 :

Explication Figure 17 :

- **Préparation de la pièce brute** : Fixation et positionnement de la pièce brute pour l'usinage.
- **Tournage (pièces rondes, prismatiques)** : Mise en forme de la pièce par rotation et enlèvement de matière avec un outil de coupe.
- **Cémentation** : Enrichissement superficiel de l'acier en carbone pour augmenter sa dureté.
- **Trempe** : Durcissement de l'acier par chauffage suivi d'un refroidissement rapide.
- **Revenu** : Traitement thermique après la trempe pour réduire la fragilité et améliorer la ténacité.
- **Taillage d'engrenages** : Création des dentures des engrenages par des procédés d'usinage spécifiques.
- **Rectification** : Usinage de précision pour obtenir des surfaces très lisses et des tolérances dimensionnelles étroites.

Annexe 5 :

Explication Figure 18 :

- **Blocs moteurs** : Usinage des pièces principales qui constituent la structure du moteur.
- **Bielles** : Usinage des pièces qui relient les pistons au vilebrequin.
- **Cylindres moteurs** : Usinage des cavités où se déplacent les pistons.
- **Culasses** : Usinage des parties supérieures du moteur qui contiennent les soupapes.
- **Vilebrequins** : Usinage des arbres qui transforment le mouvement linéaire des pistons en rotation.

- **Arbres à cames :** Usinage des arbres qui contrôlent l'ouverture et la fermeture des soupapes.
- **Nettoyage et rinçage des pièces :** Élimination des résidus d'usinage pour préparer les pièces à l'assemblage.