

École des Hautes Études Commerciales d'Alger



Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de Master en Sciences commerciales

Option : Supply Chain Management

THEME :

**L'internet des objets au service de l'optimisation du
processus de production des produits pharmaceutiques**

Étude de cas : El Kendi

Élaboré par :

M^{elle} HASSANI Khadidja Khaoula

Dirigé par :

Pr. Boudjenana Keltoum

12^{ème} promotion

Juin 2025

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

to the purest soul and dearest sweetheart, Nani Hanane, thank you mom, for always being there.

Remerciements

J'exprime mes plus profondes gratitudee à mon encadrante, Madame le Professeur Boudjenana Keltoum, professeure à l'École des Hautes Études Commerciales, pour son engagement, sa patience, sa disponibilité et la qualité de ses conseils, qui ont été déterminants dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier Monsieur Maamri Yassine, mon maître de stage, ainsi que Madame Nada, Asma, Monsieur Bassel, Moustapha, Madame Ilham et Monsieur Houari pour leur accompagnement, leur bienveillance et leur soutien tout au long de mon stage.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel de l'entreprise El Kendi, et plus particulièrement au département de production, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et les conseils précieux qu'ils m'ont apportés.

J'exprime également ma reconnaissance au Professeur Kherri Abdenacer pour sa disponibilité et son aide précieuse, ainsi qu'à tous mes professeurs de l'École des Hautes Études Commerciales pour ces cinq années d'enseignement et de partage de savoirs. Je n'oublie pas non plus le personnel administratif de l'école, que je remercie pour son accompagnement tout au long de mon parcours.

Résumé

Face à la complexité croissante du marché et à la montée de la concurrence, les entreprises industrielles doivent repenser leurs structures et moderniser leurs processus de production. La digitalisation, portée par des technologies comme l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle, s'impose comme un levier stratégique essentiel. Elle permet une gestion optimisée des flux et une meilleure réactivité face aux exigences des clients. Cette transition s'inscrit dans le cadre de l'Industrie 4.0 et prépare l'avènement d'une production autonome, caractéristique de la sixième révolution industrielle.

Dans un premier temps, cette recherche propose un état des connaissances sur les processus de production industrielle, avec un focus particulier sur le secteur pharmaceutique. Elle s'intéresse ensuite à l'intégration des technologies de l'Internet des objets (IoT) dans ce contexte. L'étude se concentre plus précisément sur l'entreprise El Kendi, en analysant les formes de numérisation existantes, notamment l'utilisation de l'IoT, et son impact sur l'optimisation du processus de production des produits pharmaceutiques. Les aspects abordés incluent la maintenance prédictive, la traçabilité, le contrôle qualité, ainsi que la synchronisation avec les autres départements. La méthodologie adoptée repose sur une approche qualitative, basée sur des entretiens semi-directifs.

Les résultats montrent que l'intégration de l'IoT chez El Kendi reste partielle, bien que des systèmes avancés soient déjà en place, ceux-ci constituent plutôt une base compatible avec une future architecture IoT pleinement déployée.

Mots clés : Processus de production, Produits pharmaceutiques, Médicaments, Entreprise intelligente, Révolution industrielle, Maintenance prédictive, Traçabilité, Contrôle qualité

Abstract

In the face of increasing market complexity and growing competition, industrial companies must rethink their structures and modernize their production processes. Digitalization, driven by technologies such as the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence, has become a key strategic lever. It enables optimized flow management and greater responsiveness to customer demands. This transition is part of the industry 4.0 framework and paves the way for autonomous production, a hallmark of the sixth industrial revolution.

This research initially presents the current state of knowledge regarding industrial production processes, with a particular focus on the pharmaceutical sector. It then explores the integration of IoT technologies in this context. The study focuses specifically on the company El Kendi, analyzing existing forms of digitalization—particularly the use of IoT—and its impact on optimizing pharmaceutical production processes. The key areas examined include predictive maintenance, traceability, quality control, and synchronization with other departments. The research methodology is based on a qualitative approach using semi-structured interviews.

The findings reveal that IoT integration at El Kendi is still partial: although advanced systems are already in place, they serve more as a foundation for a future, fully developed IoT architecture.

Keywords : Production process, Pharmaceutical products, Medicines, Smart enterprise, Industrial revolution, Predictive maintenance, Traceability, Quality control

Liste de figures

Figure 1 : Schéma illustrant la méthode de calcul de la valeur ajoutée.....	10
Figure 2 : Schéma représentant la classification des services en fonction de leur nature opérationnelle ou fonctionnelle.....	14
Figure 3 : La place de la gestion de production et les autres fonctions de l'entreprise.....	18
Figure 4 : Le fonctionnement de la méthode MRP.....	22
Figure 5 : Exemple d'éléments essentiels d'un tableau Kanban.....	25
Figure 6 : Exemple d'une carte Gantt.....	26
Figure 7 : Organisation d'une entreprise de production pharmaceutique.....	28
Figure 8 : Les différentes formes pharmaceutiques solides.....	39
Figure 9 : Distinction entre deux types différents de comprimés.....	42
Figure 10 : Exemple d'une salle de pesée.....	43
Figure 11 : Matériels utilisés dans le mélange et la granulation humide/sèche.....	45
Figure 12 : processus de compression.....	47
Figure 13 : De l'Industrie 1.0 à l'Industrie 4.0.....	57
Figure 14 : De l'Industrie 1.0 à l'Industrie 5.0.....	60
Figure 15 : Différence entre la circulation de l'information dans une entreprise traditionnelle et celle d'une entreprise intelligente.....	64
Figure 16 : Nouvelle dimension de l'IdO.....	74
Figure 17 : Domaines d'application du M2M.....	79
Figure 18 : Formes d'application de l'Internet des objets.....	81
Figure 19 : Aperçu du système de santé intelligent.....	85
Figure 20 : l'architecture fonctionnelle d'un système IoT.....	87
Figure 21 : Classement des laboratoires pharmaceutiques selon les ventes en valeur 2024...	103

Figure 22 : Présence mondiale de Ms Pharma.....	104
Figure 23 : Usines de production de Ms Pharma.....	105
Figure 24 : Les associés de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament selon le site Sidjilcom.....	106
Figure 25 : Photographie qui met en évidence le site de fabrication El Kendi à Rahmania...	107
Figure 26 : Historique de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament.....	108
Figure 27 : Activités exercées par l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament.....	108
Figure 28 : Lignes de production d'El Kendi.....	109
Figure 29 : L'organigramme de l'entreprise El Kendi.....	111
Figure 30 : Axes principaux d'analyse.....	129

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau comparatif des systèmes de gestion : ERP, MRP et MES.....	23
Tableau 2 : Tableau comparatif des composants d'un médicament.....	33
Tableau 3 : Tableau explicatif des différentes formes pharmaceutiques.....	36
Tableau 4 : Les caractéristiques nécessaires du PA selon le type de médicament solide.....	37
Tableau 5 : Les rôles des excipients.....	38
Tableau 6 : Types de comprimés.....	41
Tableau 7 : Comparaison entre les trois techniques : granulation à sec et humide ainsi que le mélange à sec.....	46
Tableau 8 : Différences entre l'enrobage entérique et le pelliculage.....	47
Tableau 9 : Tableau comparatif entre les fonctionnalités des OC et les équipements de bureau.....	76
Tableau 10 : Tableau explicatif des différences entre HTTP et REST.....	86
Tableau 11 : Marché pharmaceutique en Algérie 2024.....	97
Tableau 12 : Fiche technique de l'entreprise El Kendi.....	110
Tableau 13 : Les forces et les faiblesses de la fonction de production.....	115
Tableau 14 : Tableau exploratoire des forces et faiblesses des HMI.....	117
Tableau 15 : Tableau comparatif entre l'IoT et les HMI.....	118
Tableau 16 : Profils des interviewés.....	130
Tableau 17 : Description des thèmes du guide d'entretien et leurs objectifs.....	131
Tableau 18 : Deuxième partie du profil des interviewés – déroulement des entretiens.....	132

Liste des abréviations

Industrie 4.0	Quatrième Révolution Industrielle
IoT	Internet Des Objets
CPHS	Systèmes Cyber-Physiques Et Humains
PLC	Programmable Logic Controller
RFID	Radio Frequency Identification
MES	Manufacturing Execution System Système D'exécution De La Fabrication
ERP	Progiciel De Gestion Intégré Enterprise Resource Planning
LMS	Learning Management System
IaaS	Infrastructure As A Service
PaaS	Platform As A Service
SaaS	Software As A Service
HPC	Le Calcul Haute Performance
WSN	Wireless Sensor Network
M2M	Machine-To-Machine

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Partie 1 : Étude Bibliographique

Chapitre 1 : De la production industrielle aux processus pharmaceutiques.....	5
Section 1 : Introduction à la production industrielle.....	7
Section 2 : Les processus pharmaceutiques.....	26
Chapitre 02 : L'Industrie 4.0 et l'Internet des Objets dans la production industrielle.....	52
Section 1 : Fondements, évolution et piliers technologiques de l'Industrie 4.0.....	54
Section 2 : L'Internet des Objets comme levier d'optimisation des processus production.....	73

Partie 2 : Traitement de la problématique

Chapitre 3 : Environnement professionnel et état de l'art.....	93
Section 1 : Présentation de l'organisme d'accueil.....	95
Section 2 : Revue de la littérature et travaux connexes.....	118
Chapitre 4 : Méthodologie de la recherche et analyse des résultats	124
Section 1 : Méthodologie de la recherche.....	126
Section 2 : Présentation et analyse des résultats.....	132
Conclusion générale	144

Introduction générale

Introduction générale

Durant ces dernières années, les sociétés industrielles ont subi une transformation marquante dans différents domaines de l'économie. Cependant, cette avancée ne suffit pas pour répondre aux enjeux posés par l'évolution rapide du contexte commercial, l'aggravation de la compétition et les demandes de plus en plus grandes des clients. Aujourd'hui plus que jamais, les entreprises doivent reconsidérer leur structure organisationnelle pour garantir leur performance économique, leur excellence opérationnelle ainsi que leur résilience, agilité et durabilité en réponse aux variations du marché.

Sous cet angle, le secteur économique se positionne indéniablement dans un processus d'ajustement visant à perfectionner les services offerts et à s'adapter à un modèle de marché de plus en plus complexe et compétitif. Cette transition engendre l'apparition de nouvelles tâches et obligations au sein de l'entreprise industrielle, en particulier pour le département production, qui joue un rôle crucial. Elle se concentre maintenant sur l'optimisation des flux pour diminuer les coûts, améliorer la qualité et réduire les temps de livraison. Il est primordial de positionner le client au centre du processus de production, en ajustant l'offre à ses exigences spécifiques. De plus, une coordination efficace des divers éléments de production (la main-d'œuvre, le capital, les ressources et les outils techniques) est essentielle.

Dans ce contexte, l'option du processus de production nécessite un choix minutieux des outils, techniques et procédures indispensables pour une production efficace, tout en investissant dans les technologies récentes. Le but est d'assurer une gestion intégrée des flux physiques, financiers et d'information. Par conséquent, l'entreprise est tenue d'instaurer un système d'information efficace, intégrant les ressources humaines, les instruments informatiques et les moyens de communication à distance. L'objectif de ce système est de rassembler, gérer, conserver, centraliser et rationaliser les informations relatives au processus de production. Cela facilite les opérations et assure la production de produits de haute qualité répondant aux exigences des clients. Cela aide à améliorer sa compétitivité sur le marché.

Ainsi, embrasser l'idée de numérisation du processus de production constitue un atout stratégique de première importance. Elle représente une nouvelle expertise dans le domaine de la gestion industrielle, offrant aux entreprises une variété d'outils technologiques pour générer de la valeur et améliorer la gestion de leur système de production.

On connaît ces technologies dans le contexte de l'Industrie 4.0. On trouve diverses technologies : l'Internet des objets, l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique, la simulation et la réalité augmentée.

Au vu des avancées présentes, nous sommes sur le seuil de la sixième révolution industrielle. Nous opérons désormais dans un environnement automatisé, où les procédés industriels gagnent en autonomie. Chaque processus industriel sera totalement indépendant.

Quand nous évoquons l'automatisation, il est inévitable que nous mentionnions également l'Internet des objets.

Kevin Ashton a introduit le concept « Internet des objets (IoT) » en 1999, et cette expression est désormais largement utilisée dans la communauté académique. L'idée de contrôler à distance les appareils électriques et électroniques (objets) est familière depuis le commencement des années 1990.

De nos jours, l'IoT s'est imposé comme un des instruments les plus puissants intégrant diverses technologies et modes de communication comme la *Radio Frequency Identification* (RFID), le Bluetooth, le Wi-Fi, entre autres.

Ainsi, il apparaît clairement que la digitalisation et l'intégration des technologies avancées dans les processus de production sont devenues une nécessité pour toute entreprise industrielle. Ces technologies ne se contentent pas de faciliter les tâches et de faire gagner du temps ; elles permettent également aux entreprises de s'inscrire pleinement dans la dynamique mondiale de transformation numérique.

C'est dans cette perspective que nous avons choisi le thème de recherche suivant :

« L'Internet des objets au service de l'optimisation des processus de production des produits pharmaceutiques », étude de cas : « L'entreprise SPA El Kendi ».

Notre étude vise à répondre à la problématique suivante : « De quelle manière l'exploitation actuelle de l'Internet des objets au sein de l'entreprise El Kendi contribue-t-elle à l'optimisation de son processus de production, et quelles perspectives d'innovation sont envisagées dans ce cadre ? »

Pour pouvoir traiter cette problématique, il est nécessaire d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Comment l'Internet des objets est-il actuellement intégré dans les processus de production de l'entreprise El Kendi ?
- Quels sont les obstacles et les contraintes rencontrés dans l'utilisation de cette technologie ?
- Quelles opportunités d'innovation peuvent être envisagées dans le cas de l'entreprise El Kendi ?

Dans le cadre de l'élaboration de notre étude, nous n'avons pas formulé d'hypothèses, car nous avons opté pour une approche qualitative, en adoptant une démarche déductive. Notre objectif est de mener une recherche exploratoire sur l'intégration de l'Internet des objets dans les processus industriels de production de l'entreprise El Kendi.

La méthodologie mise en œuvre repose sur une recherche documentaire approfondie, par la consultation de plusieurs livres, articles, sites web spécifiques ainsi que des travaux universitaires en rapport avec notre sujet d'étude, également des documents internes de l'entreprise.

Pour mener à bien cette recherche, notre travail est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente un aperçu général des processus de production industriels, avec un focus particulier sur les processus de production pharmaceutiques.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'Industrie 4.0 : ses principales technologies, les différentes révolutions industrielles, et l'importance de l'Internet des objets dans le secteur industriel.
- Le troisième chapitre présente l'entreprise d'accueil, SPA El Kendi, ainsi qu'une revue de la littérature portant sur des études connexes en lien avec notre thématique.
- Enfin, le quatrième chapitre est dédié à la méthodologie de recherche, à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus, ainsi qu'aux perspectives d'innovation identifiées au sein de l'entreprise.

Chapitre 1

*De la Production Industrielle aux
Processus Pharmaceutiques*

Introduction

L'environnement économique actuel se caractérise par une complexité croissante, due à la saturation progressive des marchés, à l'intensification de la concurrence et à l'augmentation constante des exigences de l'environnement. Ces facteurs rendent la demande de plus en plus volatile et difficile à anticiper. Dans ce contexte, les entreprises industrielles, et en particulier celles du secteur pharmaceutique, sont contraintes de s'adapter en réorganisant leurs opérations de production. L'objectif est de renforcer leur flexibilité, d'optimiser l'utilisation des ressources et d'améliorer leurs performances opérationnelles.

Cette adaptation implique l'abandon des méthodes de production traditionnelles, devenues peu compétitives, au profit de modèles organisationnels innovants et plus performants. Dans l'industrie pharmaceutique, où la qualité, la traçabilité et la conformité réglementaire sont cruciales, cette transformation est d'autant plus stratégique. Elle repose sur l'adoption de nouveaux procédés et techniques de gestion de la production, permettant non seulement de répondre efficacement aux exigences du marché, mais aussi de garantir la sécurité et l'efficacité des médicaments produits.

Dans ce chapitre, nous développerons deux grandes sections. La première sera consacrée à l'étude de la production industrielle dans sa globalité, en mettant en lumière ses principes fondamentaux, son rôle stratégique ainsi que les principaux outils qui lui sont associés. La seconde section portera spécifiquement sur les processus de production pharmaceutique. À ce titre, nous nous attacherons à examiner les spécificités de la production dans ce secteur, en analysant ses exigences réglementaires, ses contraintes techniques et ses méthodes particulières.

Section 1 : Introduction à la production industrielle

Dans la première section, nous allons traiter le cadre général de la production industrielle, présenter quelques définitions du concept de production, la différence entre production industrielle et non industrielle, ainsi que son rôle dans la chaîne de valeur et dans l'entreprise. Nous présenterons aussi les processus de production et les services qui y sont liés, et nous conclurons en présentant les outils et méthodes de la production.

1.1. La production : définition et impact en milieu industriel

Lorsqu'il s'agit de processus industriels, la production s'impose immédiatement comme centre vital de ces processus. Elle désigne généralement¹ l'ensemble des activités permettant de transformer des ressources, qu'il s'agisse de matières premières, d'équipements ou de main-d'œuvre, en produits finis ou semi-finis, créant ainsi de la valeur.

Son rôle ne s'arrête pas là : la production influence au premier degré l'ensemble des coûts, la qualité ainsi que les délais de livraison des produits finis.

1.1.1. Définition de la notion de production

La production, comme l'indique le nouveau dictionnaire des synonymes LAROUSSE² se réfère à l'action de faire exister, émettre, former un nouveau bien destiné à la consommation.

Selon l'Institut national de la statistique et des études économiques³, la production se définit comme « *l'activité exercée sous le contrôle, la responsabilité et la gestion d'une unité institutionnelle qui combine des ressources en main-d'œuvre, capital et biens et services pour fabriquer des biens ou fournir des services dans une période comptable* ».

¹ UNIVERSITÉ CHOUAIB DOUKALI & ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES APPLIQUÉES. (2019). *Gestion de stock et approvisionnement* [Cours universitaire en ligne]. Consulté le 9 mai 2025 sur <https://fr.scribd.com/document/645214161/Gestion-de-stock-1-pdf>

² Genouvrier, É., Désirat, C., & Hardé, T. (1977). *Nouveau dictionnaire des synonymes Larousse*. Librairie Larousse.

³ INSEE. (2021, 10 septembre). *Production (comptabilité nationale)*. INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES. Consulté le 16 avril 2025 sur [https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1816#:~:text=La%20production%20est%20une%20activit%C3%A9,fournir%20des%20services%20\(P1\)](https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1816#:~:text=La%20production%20est%20une%20activit%C3%A9,fournir%20des%20services%20(P1))

Les processus purement naturels, sans intervention ou contrôle humain, ne font pas partie de la production. À titre d'exemple, la simple existence d'un bien naturel, comme les rivières, n'est pas considérée comme une production, à moins que l'humain ne construise des barrages pour l'utiliser.

1.1.2. Les secteurs de production

Il y a plusieurs secteurs de production, mettons en lumière la différence entre eux pour savoir l'emplacement de l'industrialisation dans ce contexte.

La production comprend plusieurs formes, parmi les plus connues : la production industrielle et non industrielle.

La production industrielle inclut¹ toute fabrication généralement à grande échelle, qui emploie des machines dans des usines où les processus sont organisés et standardisés. Cette production prend la forme de la fabrication d'équipements électroniques, de la construction de bâtiments, du raffinage du pétrole et de la production de produits pharmaceutiques.

Toutefois, la production non industrielle comprend des processus plutôt manuels, sur mesure, et nécessitant plus de temps pour chaque pièce. Les secteurs appartenant à cette catégorie incluent :

- la production agricole²: cela renvoie à la culture de produits végétaux (la culture de céréales, de légumes) ou bien à l'élevage des animaux (la production laitière), pour la consommation humaine ou animale. Cette production inclut naturellement la production de masse (grandes exploitations agricoles) ;

¹ Shopify. (2024, 27 octobre). Fabrication industrielle : définition, exemple, types et guide. Shopify. Consulté le 10 avril 2025 sur <https://www.shopify.com/fr/blog/fabrication-industrielle>

² Gouvernement du Québec. (2025, 28 janvier). Production agricole. Gouvernement du Québec. Consulté le 17 avril 2025 sur <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles>

- la production artisanale¹ : dans cette production, la fabrication est faite manuellement à la main, ou bien grâce à des méthodes de production simples. Ce type de production est souvent relatif à des produits uniques ou en petites quantités, comme la fabrication de meubles en bois et la couture des tenues traditionnelles ;
- la production de services² : même si les services n'étaient pas des biens matériels, leur production se voit dans la création de la valeur ajoutée. Ces services incluent l'éducation (formation), la santé (consultation médicale), et les services de conseil/assistance.

1.1.3. *La fonction production dans l'entreprise*

Pour une entreprise, la fonction production se représente³ comme l'ensemble des services qui permettent d'assurer la transformation des inputs (matières, encours) en outputs (biens, services) selon un processus structuré. Donc la fonction production joue un rôle crucial au sein de l'entreprise en englobant des tâches principales contribuant à la création de valeur ajoutée.

Wafaa Saasaa illustre⁴ cette dernière comme la richesse créée par un processus de production, calculée comme la différence entre la valeur de la production (chiffre d'affaires) et les consommations intermédiaires, c'est-à-dire l'ensemble des éléments détruits ou transformés au cours du processus de production.

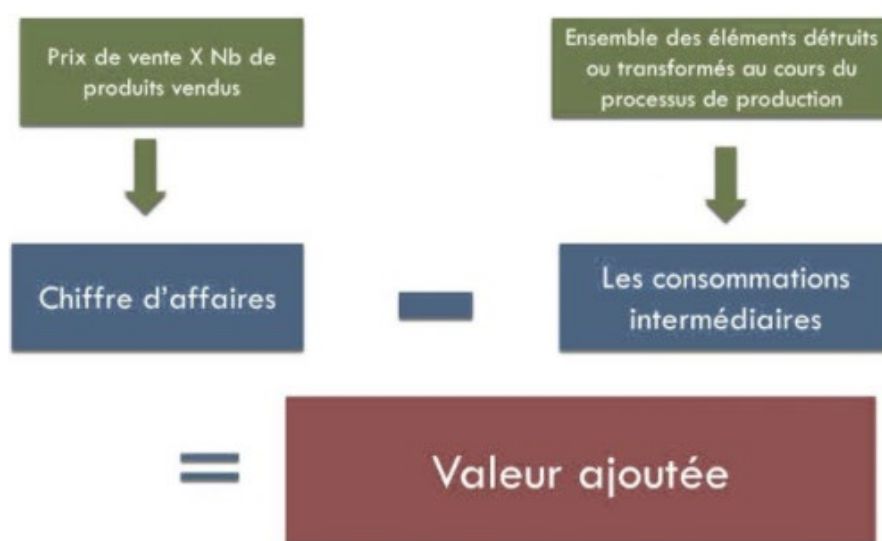
¹ StudySmarter. (2024, 9 septembre). *Productions artisanales*. StudySmarter. Consulté le 18 avril 2025 sur <https://www.studysmarter.fr/resumes/archeologie/sites-archeologiques-et-fouilles/productions-artisanales/>

² May, N. (2000). *Production des services et relation de service : quelques perspectives d'analyse*. Cahiers RAMAU, (1), 61–76. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://cahiers-ramau.edinum.org/573>

³ Charron, J.-L., Separi, S., & Bertrand, F. (2018). *Management : l'essentiel en fiches*. Dunod.

⁴ Saasaa, W. (2025). *Partie 1 - Les facteurs de production et leurs combinaisons*. Wiki des savoirs, Académie de Créteil. Consulté le 14 avril 2025 sur https://savoirs.cerpeg.fr/index.php/Partie_1_-_Les_facteurs_de_production_et_leurs_combinaisons

Figure 1 : Schéma illustrant la méthode de calcul de la valeur ajoutée



Source : (Ibid.)

Selon le Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique¹, la fonction production s'apprécie à plusieurs niveaux, parmi lesquels deux plans essentiels :

- a. le plan financier, c'est la possibilité de réduire les coûts de production en élaborant des systèmes adaptés ;
- b. le plan commercial, en rendant la production plus flexible, ce qui permet la rapidité d'exécution des tâches.

1.2. Le processus de production : rôle et répartition des activités

Si la fonction de production est définie comme la série d'activités de transformation des inputs en outputs, un processus de production représente l'exécution de cette fonction : les étapes, les méthodes, les flux de travail, la qualité, etc.

Ce processus doit être bien organisé et pertinent car son rôle impacte toutes les autres fonctions dans l'entreprise.

¹ Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique. (2012, 3 février). *La fonction Production*. Facileco. Consulté le 20 avril 2025 sur <https://www.economie.gouv.fr/facileco/fonction-production>

1.2.1. Rôle d'un processus de production

Selon Demeestère, Lorino et Mottis¹, la fonction du processus de production est de « *contribuer à la conversion des matières premières et composants en produits finis, en passant par plusieurs étapes de transformation, faisant le plus souvent appel à des technologies et des savoir-faire relevant de métiers différents. Assurer une production respectant les exigences des clients (quantité, délai, qualité...) avec une bonne maîtrise des ressources de l'entreprise nécessite une coordination entre ces activités, un pilotage de ce processus* ».

Donc, le rôle d'un processus de production ne se limite pas à la fabrication du produit, mais à une gestion structurée des différents flux de production, permettant ainsi de tracer et planifier le chemin du point initial (production de matières premières) à la livraison du produit selon les attentes du client.

Le fonctionnement d'un processus de production ne peut pas se réaliser sans la disponibilité des facteurs suivants² :

a. le capital³, se divise en deux formes : matériel ou immatériel / fixe ou circulant.

- capital matériel : les outils matériels utilisés durant la production ;
- capital immatériel : cela inclut les logiciels utilisés, brevets, savoir-faire...etc. ;
- capital fixe : l'ensemble des biens durables d'équipement destinés à rester durablement dans l'entreprise (machines, bâtiments, matériels de bureau, logiciels durables, etc.) ;
- capital circulant : l'ensemble des biens et services utilisés pour la production qui peuvent être détruits ou consommés (énergie, matières premières, services, etc.).

b. le travail, correspond à l'immobilisation des capacités physiques et intellectuelles des personnes travaillant dans l'entreprise (salariés ou non), dans le but d'obtenir un produit.

¹ Demeestère, R., Lorino, P., & Mottis, N. (2017). *Pilotage de l'entreprise et contrôle de gestion* (6e éd.). Dunod.

² Saasaa, op. cit.

³ ANNABAC. (2025). *Les facteurs de production. Fiche de révision*. Consulté le 14 avril 2025 sur <https://www.annabac.com/recherche?keys=Les+facteurs+de+production#>

1.2.2. Les unités de travail dans un processus de production

Il existe six étapes essentielles pour réaliser un processus de production, qui sont¹ :

- a. l'identification du besoin du client ;
- b. la conception du produit en élaborant des plans spécifiant le produit ;
- c. la planification en organisant les ressources : matières premières, énergie, capacité, délais et les coûts pour la production ;
- d. la réalisation de la fabrication du produit selon les spécifications statutaires ;
- e. le contrôle qualité, pour assurer les normes de qualité et les spécifications du client,
- f. et, au final, la livraison au client.

Ces étapes se classent en général sous deux natures d'activités² : activités opérationnelles et activités stratégiques.

1.3.2. Répartition des activités stratégiques et opérationnelles

Les activités stratégiques se concentrent sur "le quoi" et "le pourquoi" de l'avenir de l'entreprise, donc elles se réfèrent aux décisions et actions qui sont prises pour la direction de l'entreprise sur le long terme. À titre d'exemple³ :

- le choix des produits à produire, et des technologies utilisées dans les processus ;
- la décision de recourir à la sous-traitance ;
- la décision d'emplacement des usines, en se basant sur différents critères : l'accessibilité aux marchés concernés, ainsi que les coûts et la qualité des facteurs de production (main-d'œuvre, matériel, énergie...).

Toutefois, les activités opérationnelles se focalisent sur "le comment" du fonctionnement quotidien, donc naturellement ce sont les tâches et les processus nécessaires au fonctionnement

¹ Tanner. (2023, 8 février). *Qu'est-ce qu'un processus de production et pourquoi est-il si important pour toute industrie ?* Tanner AG. Consulté le 20 avril 2025 sur <https://www.tannerag.ch/fr/news-et-applications/qu-est-ce-qu-un-processus-de-production-et-pourquoi-est-il-si-important-pour-toute-industrie-134008>

² Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (s. d.). *Chapitre 4 : Les fonctions de l'entreprise* [Cours universitaire, fichier PDF]. Consulté le 3 avril 2025 sur <https://www.ummo.dz/fsecsg/wp-content/uploads/2019/03/Gestion-dentreprise-chapitre-4-2SFC-section-B.pdf>

³ Ibid.

quotidien de l'entreprise où les résultats sont axés sur le court terme. Voici quelques exemples de ces activités¹ :

- la planification de la fabrication en tenant compte des fluctuations des ventes et de la demande estimée. Cette planification va permettre d'élaborer les tableaux de prévisions détaillées mensuelles ou hebdomadaires pour la fabrication de chaque produit (ces tableaux concernent aussi les nomenclatures de chaque produit) ;
- la maintenance du matériel utilisé, parce que les coûts d'arrêt de production sont généralement élevés, donc il faut quotidiennement les surveiller. On distingue trois types de maintenance : préventive pour éviter les pannes dès le début, prédictive qui s'établit sur l'inspection régulière pour pouvoir prévoir les anomalies possibles, et curative qui est l'action réalisée dans le cas d'une panne et qui vise à réduire le temps d'arrêt de travail ;
- la supervision et le contrôle du processus de production en temps réel, cela inclut : l'assurance de l'assiduité du personnel ; le suivi du matériel, de l'énergie consommée, du taux de panne, du taux d'utilisation ; et enfin le suivi du déroulement de la fabrication (avancement, retards, matières consommées, durée de chaque action, taux de rebut...).

1.3. L'organisation de la fonction de production

La gestion de la fonction production au sein d'une entreprise demande la classification des activités stratégiques et opérationnelles, réparties dans les différents services liés à la production. Ces services ont généralement deux rôles : fonctionnels et opérationnels.

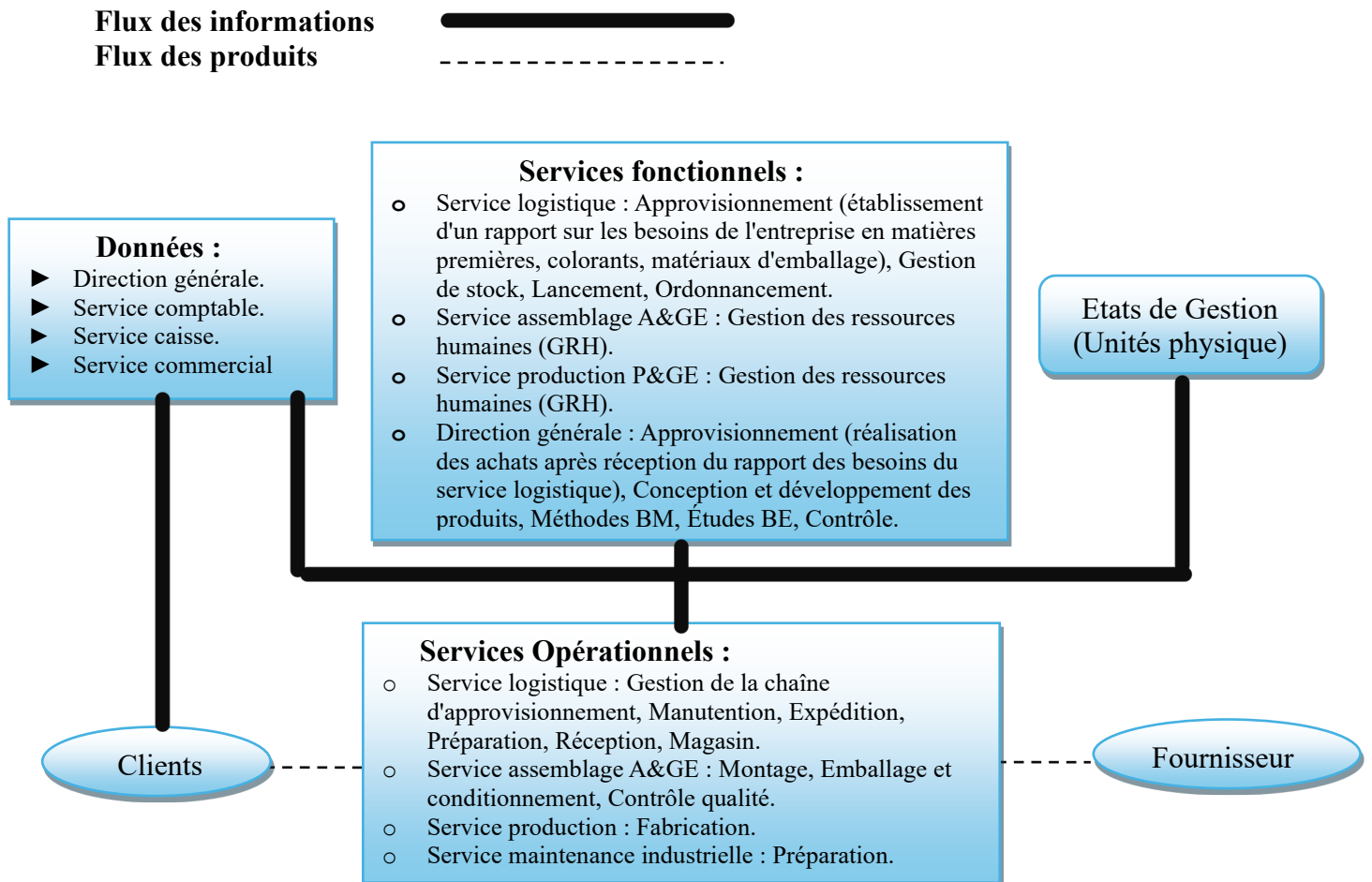
Le schéma présenté dans la deuxième figure² illustre un exemple de classification des services en fonction de leur nature dans une petite entreprise industrielle, où il montre qu'un service peut avoir deux rôles : un rôle fonctionnel et un rôle opérationnel. Prenons l'exemple du service logistique : son rôle fonctionnel concerne l'approvisionnement, en établissant un rapport sur les

¹ Tanner, op. cit.

² Hassani, K. K. (2024). *Rapport de stage de découverte de l'entreprise SNC Algeria Jeunes*, Tipaza [Rapport de stage non publié]. École des Hautes Études Commerciales (EHEC).

besoins de l'entreprise en matières premières, matériaux d'emballage, etc., et son rôle opérationnel inclut la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la manutention et l'expédition.

Figure 2 : Schéma représentant la classification des services en fonction de leur nature opérationnelle ou fonctionnelle



Source : Adapté de (Ibid., p. 20)

1.3.1. Rôle fonctionnel des services

Les rôles fonctionnels des services sont chargés de fixer les objectifs, assurent la cohérence et la régularité de la production. Ils dépendent des activités opérationnelles, même s'ils les

dirigent. La coordination entre eux s'exerce par la structure et s'organise à travers le système d'information. Parmi ces fonctions, on peut notamment mentionner¹:

- Bureau d'études : la conception des produits, ce qui inclut naturellement la mise en place des formes primaires ainsi que les nomenclatures.
- Bureau des méthodes : la préparation de la fabrication en planifiant et en répartissant les unités de travail.
- Ordonnancement : le suivi du lancement de la fabrication et la surveillance de la charge des usines et des services.
- Service de contrôle : le suivi de la production, la vérification du bon déroulement du travail des services opérationnels selon les exigences données par le service d'ordonnancement, en termes de temps, de qualité, de productivité et de coûts.

1.3.2. Rôle opérationnel des services

Cela inclut toutes les activités nécessaires à l'exécution de la fabrication. Ces services peuvent comprendre² :

- Fabrication : le processus proprement dit de transformation des ressources en produits finis ou semi-finis.
- Expédition : l'organisation et la planification des livraisons aux clients.
- Manutention : le déplacement, le transport et la manipulation des matières premières, des composants et des produits finis tout au long du processus de production.

¹ Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, op. cit.

² Ibid.

1.4. Typologie des systèmes de production

La typologie dans ce contexte signifie les méthodes utilisées par une entreprise pour organiser sa production. Ces méthodes peuvent se distinguer selon plusieurs critères¹ :

1.4.1. Selon l'organisation du flux de production, nous distinguons trois types :

- production en continu (flow-shop) : la fabrication d'un seul type de produit à grande échelle. À titre d'exemple, les industries pétrochimique, cimentaire, de fabrication de conditionnement Coca-Cola ;
- production en discontinu (job-shop) : la fabrication de nombreux produits variés à des quantités faibles. La mise en œuvre est réalisée par ateliers fonctionnels qui utilisent les machines en fonction de la tâche qu'elles exécutent (tournage, fraisage...). Ce type inclut les industries mécaniques ainsi que les entreprises de confection ;
- production par projet : la fabrication des produits est unique, ou les processus de production se réalisent pour une durée de vie (one life time). C'est le cas de l'organisation des Jeux olympiques et de la construction des barrages.

1.4.2. Selon la relation avec le client, cela inclut² :

- la production à la commande : c'est la fabrication qui se réalise après la confirmation ferme de la commande par le client ;
- vente en stock : dans ce cas-là, la production a pour but la satisfaction des clients en se basant sur les prévisions. Ou le délai de fabrication est supérieur au délai de livraison accordé avec le client (par exemple ; radio, vêtements) ;
- assemblage à la commande : ce type de production se situe entre la production à la commande et la vente en stock, il vise à réduire le délai entre la commande et le délai de livraison. La fabrication ici concerne des produits standardisés sous forme semi-finie.

¹ Ibid.

² Courtois, A., Pillet, M., & Martin-Bonnefous, C. (2003). *Gestion de production* (4e éd.). Éditions d'Organisation.

1.4.3. Selon la quantité produite et la répétitivité, ce critère porte sur quatre formes de fabrication¹ :

- la production unitaire, qui implique la création personnalisée d'articles uniques tels que des meubles et des navires ;
- fabrication par lot : la production en série de biens tels que des voitures ;
- fabrication en série : la production en grande quantité de produits tels que des vêtements ;
- production continue : fabrication à grande échelle similaire à celle des boissons.

1.5. Méthodes et outils de gestion de la production

La réalisation et le contrôle des processus de production sont assurés par la gestion de la production, ce qui permet une contribution à l'optimisation des flux physiques et des flux d'information correspondants.

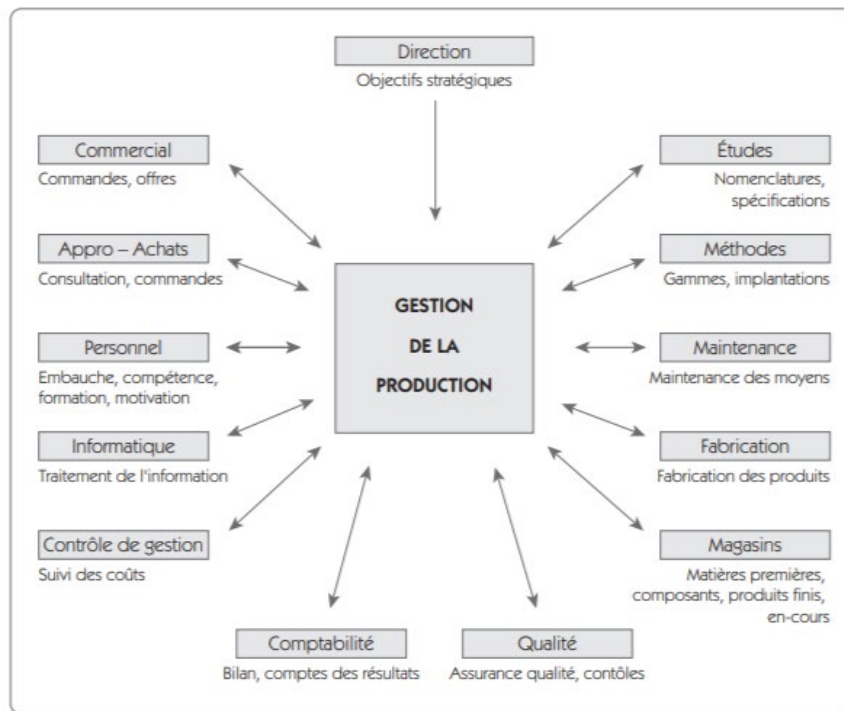
Le schéma montré dans la figure numéro trois illustre² l'emplacement de la gestion de la production au sein d'une entreprise. Il s'agit d'une fonction de coordination qui collabore avec tous les autres départements, notamment :

- le département des études, en fournissant les nomenclatures et les spécifications techniques ;
- le département commercial, en apportant les commandes et les offres clients ;
- le département approvisionnement/achat, en gérant les consultations fournisseurs et les commandes de matières ;
- la direction générale, en fixant les objectifs stratégiques à atteindre.

¹ Ibid.

² Ibid., p. 12.

Figure 3 : La place de la gestion de production et les autres fonctions de l'entreprise



Source : (Ibid, p. 12)

1.5.1. Logiques de pilotage de la production

Le pilotage de la production dans une entreprise est adopté selon la nature de la commande des clients. Dans cette configuration, nous pouvons distinguer deux types de processus¹ :

1.5.1.1. Le pilotage par l'amont (production à flux poussé / push system)

Dans ce cas, le délai de livraison est réduit et la satisfaction du client est plus élevée, car les marchandises sont déjà en stock.

Le principal avantage du flux poussé est constitué par la réactivité face aux commandes, qui fait aujourd'hui partie des exigences client.

¹ RUBAFILM. (2020, 20 août). *Flux poussé VS flux tiré ? RUBAFILM*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.rubafilm.com/flux-pousse-vs-flux-tire/#:~:text=Flux%20pouss%C3%A9%20et%20flux%20tir%C3%A9%20%3A%20d%C3%A9finition&text=Dans%20le%20cas%20du%20flux,n'y%20ait%20de%20commande>

Puisque les marchandises sont fabriquées avant même d'être vendues dans le cas des flux poussés, les moyens financiers sont donc engagés par l'entreprise et la production des marchandises est payée avant qu'un besoin n'apparaisse. Les marchandises seront perdues si elles ne trouvent pas d'acquéreurs, ce qui constitue le principal inconvénient de ce système. Un risque de perte d'argent est donc encouru par l'entreprise. À cela s'ajoutent les frais de stockage des marchandises produites de manière anticipée.

1.5.1.2. Le pilotage par l'aval (production à flux tirés / pull system)

Ce type repose sur l'idée que ce qui est produit est déjà vendu, pour éviter tout gaspillage. Aucun ou très peu de stock est généré par la méthode du flux tiré, ce qui représente l'énorme avantage de ce système. Aucune nécessité d'espace de stockage n'est requise, celui-ci représentant souvent un des coûts les plus élevés de l'entreprise. Moins de frais de gestion de stock sont également constatés¹.

Tant qu'un client n'a pas commandé, rien n'est produit ; ce type est bien visible dans les « fast-food ». Ce type de production ne tolère aucune erreur, ce qui en constitue le principal inconvénient. Des conséquences importantes peuvent être causées par une erreur humaine, un mauvais processus ou une coordination déficiente. Il est donc nécessaire que chaque étape de production soit bien vérifiée et que le bon fonctionnement de l'ensemble soit assuré avant que le flux tiré ne soit adopté².

1.5.2. Outils de gestion de la production

Les outils de gestion de production varient entre des logiciels, des systèmes et même des méthodes, mais ils servent toujours les mêmes objectifs, qui sont la planification, l'organisation et le suivi des différentes étapes du processus de production. Parmi ces outils, nous allons évoquer l'ERP, le MRP, le MES, le Kanban et le Gantt Project.

¹ Ibid.

² Ibid.

1.5.2.1. Planification des ressources d'entreprise (ERP)

C'est un système logiciel¹ conçu pour diriger les différentes opérations quotidiennes de l'entreprise, en les divisant en modules : achats, comptabilité, gestion des projets, etc. L'abréviation ERP réfère, en anglais, à Enterprise Resource Planning. Elle relie les différents flux de données au sein de l'entreprise et garantit une source unique et fiable d'informations.

Les systèmes ERP sont déployés sous forme de plates-formes, soit sur site, soit dans le cloud. Ils permettent le suivi continu du cycle global de production, de la logistique et des finances. Ainsi, ils ont accès aux workflows et aux données de chaque service, ce qui leur permet de les gérer de manière efficiente².

Grâce à des personnalisations possibles selon le secteur d'activité, plusieurs fonctions au sein des entreprises, y compris des PME, sont prises en charge par les systèmes et logiciels ERP.

L'utilisation de l'ERP sur le cloud est automatiquement liée à l'intégration de différentes technologies avancées, telles que l'Internet des objets et l'intelligence artificielle. Les applications front-office sont également intégrées à l'ERP, notamment dans le cadre de la gestion de la relation client (CRM), afin de faciliter le traitement de toutes les informations liées aux clients. Ces technologies sont combinées à l'ERP pour en faire évoluer les fonctionnalités traditionnelles et créer de nouvelles opportunités pour l'entreprise³.

La gestion des systèmes ERP est assurée en collaboration avec le directeur financier, le directeur informatique, le directeur des opérations et d'autres dirigeants clés, étant donné que ces systèmes couvrent des fonctionnalités complètes à l'échelle de l'entreprise⁴.

¹ Oracle. (s. d.). *Qu'est-ce que l'ERP ?* Oracle Afrique. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.oracle.com/africa-fr/erp/what-is-erp/#:~:text=L'acronyme%20ERP%20signifie%20Enterprise,finance%2C%20la%20comptabilit%C3%A9%2C%20etc>

² Ibid.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

1.5.2.2. Management des ressources de production (MRP)

C'est un outil de gestion des stocks et des approvisionnements. Ainsi, il concerne seulement le service production.

Le MRP est représenté comme une méthode de planification de la production qui est utilisée dans le pilotage par l'amont. Cette méthode a connu deux évolutions globales¹ :

- le MRP 1 (*Materials Requirements Planning*), qui concernait le calcul des besoins des composants (nomenclatures) ;
- le MRP 2 (*Manufacturing Resources Planning*), qui est le MRP actuel.

Cette méthode est intégrée dans des progiciels comme l'ERP. Elle tend à assurer la disponibilité des composants, des matières premières ainsi que celle des produits finis, à maintenir le niveau de stock le plus réduit possible et à planifier les dates de fabrication, de livraison et de réapprovisionnement².

Le schéma de la quatrième figure³ illustre le fonctionnement de la méthode MRP. Cette méthode fait partie de la méthode de planification par l'amont, car elle part de la demande client, remontant ainsi vers la production et la décomposition des composants du produit final. Donc, c'est une méthode de production pilotée par l'amont, mais basée sur une logique l'aval (la demande client).

Ce schéma⁴ montre en ordre :

- le premier acteur qui est le client, où sa demande s'enregistre dans le carnet de commandes, précisant la quantité commandée, les délais et la qualité ;

¹ 1LIFE. (s. d.). *Qu'est-ce que le MRP (Materials Requirements Planning) et le MRP2 (Manufacturing Resources Planning)*. Oracle. Consulté le 25 avril 2025 sur <https://www.oracle.com/africa-fr/erp/what-is-erp/#:~:text=L'acronyme%20ERP%20signifie%20Enterprise,finance%2C%20la%20comptabilit%C3%A9%2C%20etc>

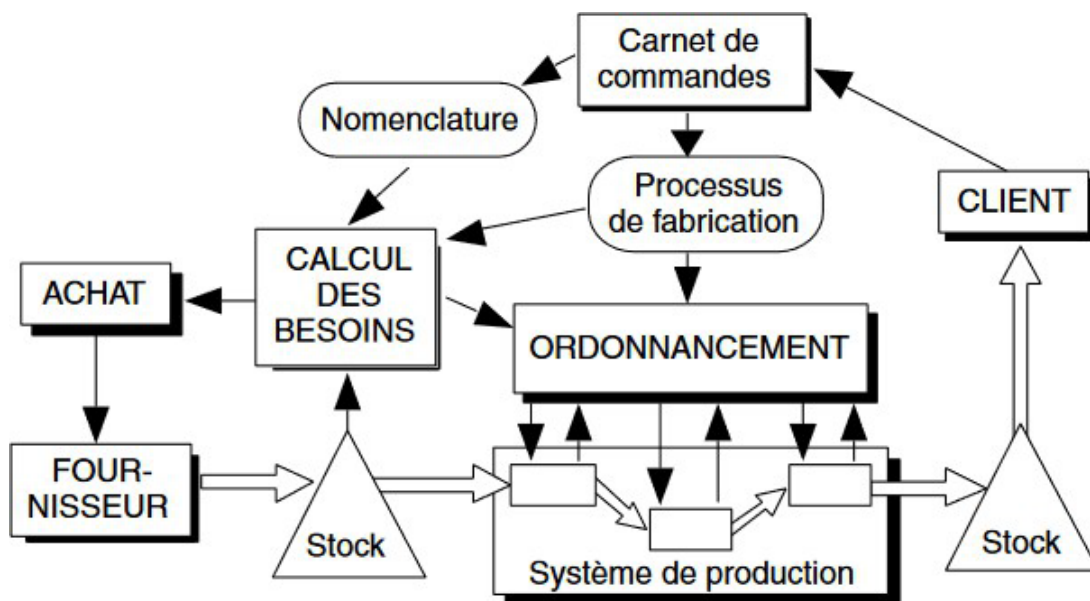
² Ibid.

³ Georges, J. (2010). *Organisation et gestion de la production* (4e éd.). Dunod.

⁴ Ibid., p. 284.

- les nomenclatures, qui détaillent la structure du produit fini, en le décomposant en sous-ensembles et composants hiérarchisés ;
- le processus de fabrication, alimenté par les informations fournies par le carnet de commandes et les nomenclatures ;
- le calcul des besoins, en déterminant la quantité nécessaire de produits finis, ainsi que leurs composants, et les délais production ;
- l'ordonnancement, où il faut organiser et planifier la production par ordre selon le plan hiérarchique des composants de chaque produit (nomenclatures) ;
- le système de production, c'est l'emplacement où la réalisation de la fabrication se fait ;
- le stock, qui contient à la fois les matières premières, les composants, et les produits finis prêts à être livrés ;
- achat et fournisseur, pour approvisionner les matières premières et composants, tout en veillant à respecter les conditions de qualité, de quantité et de délais ;
- au final, le client, qui va recevoir sa commande.

Figure 4 : Le fonctionnement de la méthode MRP



Source : (Ibid., p. 284.)

1.5.2.3. Système de gestion de la production (MES)

C'est un outil de pilotage de la production qui documente en temps réel l'exécution de la production, donc la transformation des matières premières en produits finis¹.

Les objectifs de ce système comprennent² :

- le suivi de l'ensemble de la production et la surveillance continue ;
- la planification des ordres de fabrication ;
- la traçabilité du cycle de vie des produits ;
- le contrôle qualité en temps réel ;
- ainsi que l'analyse des performances (taux de rebut, arrêts, etc.).

Dans le tableau numéro un, et d'après les définitions précédentes des systèmes ERP, MRP et MES (adapté de Oracle, s. d. ; 1Life, s. d. ; Georges, 2010, p. 284 ; Visiativ, 2024), nous résumons les critères qui les différencient.

Tableau 1 : Tableau comparatif des systèmes de gestion : ERP, MRP et MES

Fonction / Système	MES	MRP	ERP
Niveau	Opérationnel (usine)	Tactique (planification)	Stratégique (global entreprise)
Temps	Temps réel	Planification (à moyen terme)	Temps différé / consolidé
Couvre	Suivi et exécution de la production	Besoins en composants/matières	Toute l'entreprise
Objectif	Optimiser la production en cours	Planifier les besoins	Gérer l'ensemble des ressources

¹ L'Expo Permanente. (s. d.). *Le logiciel MES pour le pilotage de la production* | AVEVA MES Operations. Usine Nouvelle. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.usinenouvelle.com/expo/le-logiciel-mes-pour-le-pilotage-de-la-p-p384679450.html>

² Visiativ. (2024). *Définition : Logiciel MES*. Visiativ. Consulté le 28 avril 2025 sur <https://www.visiativ.com/definition/mes/>

Exemple d'utilisation	Suivre un ordre de fabrication en cours	Calculer combien de pièces commander	Générer une facture fournisseur
------------------------------	---	--------------------------------------	---------------------------------

Source : Adapté de (Oracle, s. d. ; 1Life, s. d. ; Georges, 2010, p. 284 ; Visiativ, 2024)

1.5.2.4. Kanban

Kanban est un processus de gestion Lean qui permet d'optimiser les *workflows* grâce à la visualisation des tâches à l'aide de tableaux spécifiques, nommés tableaux d'affichage¹.

Cette méthode repose sur le principe du pilotage par l'aval, où la production est basée sur la commande du client (Juste-à-temps).

Le Lean est un processus de production directionnel qui s'intéresse à la gestion sans gaspillage. À cette fin, l'objectif ici est de réduire toutes les activités inutiles sans compromettre la productivité².

La figure numéro cinq³ montre un exemple de tableau Kanban tout en indiquant certains choix fondamentaux qui constituent un tableau Kanban :

- limite de travail en cours (WIP Limit) : pour cet exemple, elle est indiquée dans la case “En cours 3/4”. Cela veut dire qu’il ne peut y avoir plus de 4 tâches en cours simultanément. Actuellement, il y en a 3. Son but étant de restreindre le nombre de travaux en cours afin d'améliorer le flux ;
- colonne (Column) : chaque colonne représente un sous-processus ; Demandé (Requested), En cours (In Progress), Terminé (Done) ;
- carte (Card) : chaque carte est un objet décrivant une tâche. C’est une carte qui auparavant contenait un titre, une description, et des informations comme son avancement ou le chef d’équipe responsable ;

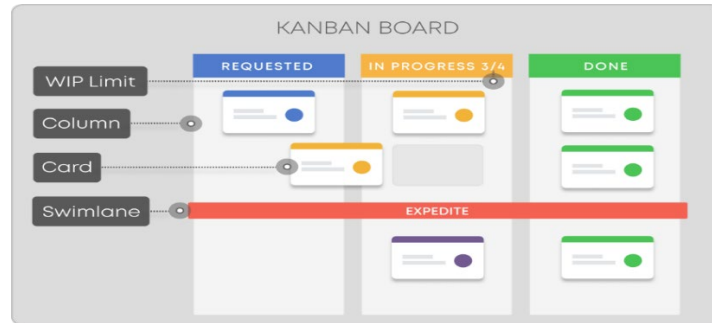
¹ Businessmap. (s. d.). *Qu'est-ce que Kanban ? Guide du Débutant*. Businessmap. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://businessmap.io/fr/ressources/debuter-avec/methode-kanban>

² Ibid.

³ Ibid.

- couloir de nage (Swimlane) : horizontale. À la ligne si un couloir de nage vous indiquez 'Expedite' ce qui implique qu'il sert à classer les tâches par ordre de priorité (Ex : Pour les urgentes). C'est une manière de gérer plusieurs de ces activités dans un seul et unique tableau.

Figure 5 : Exemple d'éléments essentiels d'un tableau Kanban



Source : (Ibid.)

1.5.2.5. Gantt Project

Cet outil est un logiciel de planification et d'ordonnancement, qui est employé pour gérer un diagramme de Gantt.

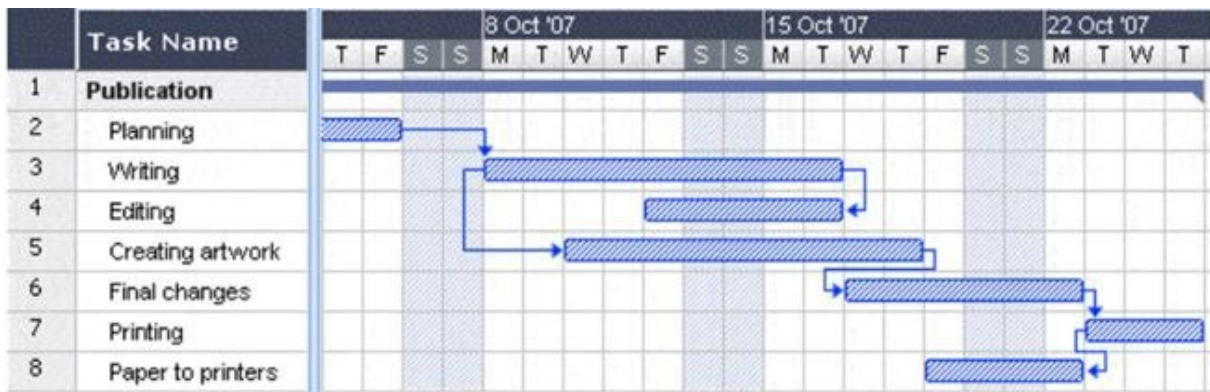
Ce diagramme sert à représenter les diverses opérations de production sous forme de segments horizontaux placés par rapport à l'axe du temps. Il rend visibles le niveau d'avancement des diverses phases de production en rapport avec les prévisions. Il s'agit d'un outil qui convient à la fabrication de produits en série constitués de divers sous-ensembles devant être rationalisés¹.

La figure numéro six présente un diagramme de Gantt, dans lequel la colonne des tâches indique les différentes opérations à exécuter selon leur délai et leur date. Les barres pleines représentent la durée de chaque tâche, tandis que les flèches traduisent leur enchaînement et le suivi de réalisation².

¹ Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, op. cit.

² Ibid.

Figure 6 : Exemple d'une carte Gantt



Source : Gantt.com. (s. d.). *Comment créer un diagramme de Gantt*. Gantt.com. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.gantt.com/fr/creation>

Section 2 : les processus pharmaceutiques

Dans cette section, nous allons présenter l'industrie pharmaceutique et définir quelques concepts liés aux médicaments. Ensuite, nous poursuivrons avec le processus de production des médicaments, en nous concentrant sur les médicaments sous forme solide, comme les comprimés pelliculaires.

2.1. Introduction à l'industrie pharmaceutique

L'industrie pharmaceutique regroupe l'ensemble des activités impliquées dans la production et la commercialisation des médicaments. Selon Maaboub Fatima¹, cette industrie est définie comme « *la fabrication de médicaments sous forme de substances chimiques, de plantes médicinales ou de plantes brutes, que le pharmacien synthétise et soumet à une série de recherches, d'analyses et de tests, jusqu'à ce que le médicament puisse être utilisé par le consommateur sous sa forme finale* ».

Autrement dit, de manière plus claire, l'industrie pharmaceutique² couvre les multiples procédures de transformation des matières premières, qui peuvent provenir de plantes ou de

¹ متطلبات نيل شهادة دكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية (2016). ف. محبوب، [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Faculté des sciences économiques, commerciales et des sciences de gestion]. Biskra, p. 135.

² Statista. (2024). Pharmaceuticals - Algeria. Consulté le 28 avril 2025 sur <https://www.statista.com/outlook/hmo/pharmaceuticals/algeria>

produits chimiques, afin d'obtenir des médicaments dont le but est de soigner, prévenir, voire diagnostiquer les maladies. Ces médicaments sont disponibles en pharmacie, certains accessibles uniquement sur ordonnance, d'autres en libre accès.

Le secteur pharmaceutique est l'un des secteurs les plus réglementés, exigeant ainsi le respect strict de normes telles que les Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF)¹. Cette mission est assurée par deux structures indispensables² : les ateliers de production et les laboratoires de contrôle qualité.

La figure numéro sept³ illustre un organigramme hiérarchique d'une organisation de production pharmaceutique, de la manière suivante :

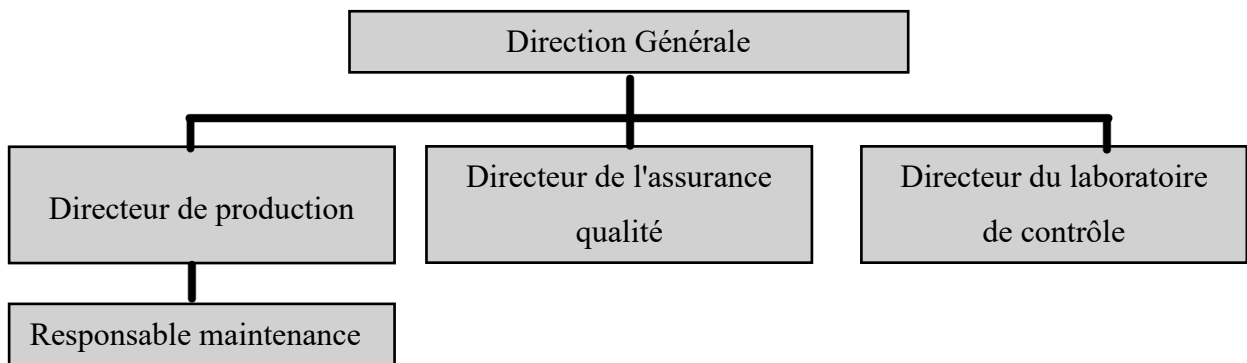
- niveau supérieur : la Direction Générale, qui supervise tous les départements ;
- niveau intermédiaire : le Directeur de production, responsable de l'ensemble des activités de production ; le Directeur de l'assurance qualité, garant de la conformité des processus de production aux standards de qualité ; et le Directeur du laboratoire de contrôle, chargé des analyses et tests sur les produits pour vérifier leur conformité aux normes (les trois directions collaborent pour garantir la mise à disposition de médicaments conformes et consommables) ;
- niveau opérationnel : le Responsable maintenance, placé sous l'autorité du Directeur de production.

¹ Selon le Guide européen des Bonnes Pratiques de Fabrication (Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé [ANSM], 2019, Chapitre 1 : système qualité pharmaceutique), l'assurance de la qualité constitue une exigence indispensable : « *la fabrication de médicaments doit être conforme à des normes de qualité appropriées afin de garantir qu'ils sont adaptés à l'usage auquel ils sont destinés.* »

² Rjem, N. (2018). *Le contrôle de qualité de la production du Neurovit 250-250 mg* [Mémoire de master, Université Badji Mokhtar]. p. 12.

³ Ibid., p. 13.

Figure 7 : Organisation d'une entreprise de production pharmaceutique



Source : Adapté de (Ibid., p. 13)

2.1.1. Les ateliers de production

Les ateliers de production¹ sont des mécanismes spécialisés où les médicaments sont fabriqués selon des normes strictes, afin de garantir la sécurité et l'efficacité des produits finis. Ces ateliers sont classés en fonction de deux critères principaux² :

- le type de produit élaboré (formes : solides ou liquides, crémeux, poudre, injectables) ;
- les différentes phases du processus incluent le pesage des ingrédients nécessaires, le mélange de ces derniers en vue de la granulation, leur compression pour former des comprimés, ainsi que leur conditionnement.

Les caractéristiques de ces ateliers sont les suivantes³ :

- un cadre maîtrisé où la température, l'humidité et la propreté sont contrôlées pour prévenir toute forme de contamination ;
- la traçabilité est garantie à chaque phase de la production, grâce à une documentation minutieuse assurant un suivi rigoureux ;

¹ LEEM. (2024, 26 février). *La production pharmaceutique c'est quoi ? Les entreprises du médicament*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.leem.org/la-production-pharmaceutique-c-est-quoi#:~:text=La%20production%20pharmaceutique%20regroupe%20l,standard%20de%20qualit%C3%A9%20tr%C3%A8s%20%C3%A9lev%C3%A9>

² Rjem, op. cit., p. 12.

³ ANSM. (2019). *Guide européen des Bonnes Pratiques de Fabrication*. Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://ansm.sante.fr/uploads/2020/10/20/2019-guide-bpf-mai-2019-3.pdf>

- avec l'évolution de l'automatisation grâce à l'Internet des Objets (IoT), ainsi qu'aux systèmes de MES (*Manufacturing Execution System*), il est possible d'améliorer et de contrôler en direct les activités ;
- le personnel qualifié suit des protocoles rigoureux et porte des équipements de sécurité adéquats.

2.1.2. *Les laboratoires de contrôle qualité*

Les laboratoires de contrôle de la qualité, appelés aussi les laboratoires d'étude de la qualité, sont des établissements chargés de l'examen minutieux et de la vérification de la conformité des matières premières et des médicaments avant et après leur fabrication. Ils visent principalement à assurer la qualité des produits et à ce que chaque produit respecte des normes et spécifications prédéfinies¹.

Les fonctions des laboratoires de contrôle qualité sont² :

- le contrôle physico-chimique incluant l'analyse de la composition chimique et du pH ainsi que la mesure des principes actifs présents dans le médicament ;
- la vérification microbiologique : garantir l'inexistence de toute forme de contamination par des micro-organismes ;
- la mise en vente des articles : un produit doit être approuvé par le laboratoire avant d'être commercialisé ;
- une documentation stricte est essentielle, les résultats doivent être consignés et stockés pour satisfaire aux exigences des organismes de santé ;
- formation et accréditations : il est essentiel que les laboratoires veillent à la formation de leur personnel ainsi qu'au maintien des certifications pour assurer la qualité de leurs analyses ;

¹ ANALAB. (s. d.). Rigoureux et fiables, votre laboratoire répond à vos exigences. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://analab-dz.com/#:~:text=Laboratoire%20de%20contr%C3%B4le%20de%20qualit%C3%A9,depuis%20plus%20de%2016%20ans.>

² LEEM. (2024, juillet). Fiche métier Responsable de laboratoire de contrôle (pp. 1-2) [PDF]. Les entreprises du médicament. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.leem.org/sites/default/files/2024-07/Responsable%20laboratoire%20de%20controle.pdf>

- la validation des approches d'analytique : il est possible pour les laboratoires d'avoir la responsabilité de concevoir et de vérifier de nouvelles méthodes d'analytique pour garantir la qualité.

Les laboratoires chargés du contrôle qualité¹ doivent respecter des normes et des règles spécifiques qui varient selon leur secteur d'activité et leur localisation spécifique où ils exercent leurs activités. Par exemple : les laboratoires spécialisés en biologie médicale doivent se conformer à la norme ISO 15189, tandis que ceux travaillant dans le domaine du calibrage et des tests doivent suivre la norme ISO 17025².

Quelques exemples de laboratoires de contrôle de la qualité sont³ :

- FILAB est un laboratoire qui se concentre sur l'évaluation de la qualité des produits pharmaceutiques ;
- ANALAB est un laboratoire qui se concentre sur l'évaluation de la qualité des produits alimentaires, des produits cosmétiques et des articles ménagers ;
- FC France est un laboratoire qui se concentre sur l'inspection minutieuse de la qualité des produits pharmaceutiques.

2.2. Concepts liés aux médicaments

L'industrie pharmaceutique comprend deux aspects fondamentaux : le développement et la création des médicaments (recherche et formulation), ainsi que le processus de leur fabrication.

¹ KOOVEA. (2024, 13 mars). Contrôle qualité en laboratoire : Comment rester conforme ? Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.koovea.com/blog/controle-qualite-laboratoire/>

² Selon les rapports de l'Organisation internationale de normalisation (traduit de International Organization for Standardization [ISO], 2017 ; traduit de International Organization for Standardization [ISO], 2022), la norme ISO 15189 se concentre sur les laboratoires de biologie médicale chargés d'effectuer les analyses pour les médecins dans le but d'assurer la fiabilité et la pertinence des résultats pour le diagnostic des patients, tandis que la norme ISO 17025 couvre divers secteurs tels que l'industrie et l'environnement ainsi que la santé, dans le but de prouver la précision et la reconnaissance internationale des résultats des tests.

³ KOOVEA, op. cit.

2.2.1. Définition du médicament

Selon le Code de la Santé publique¹, le médicament est défini comme : « *toute substance ou composition présentée comme possédant des propriétés curatives ou préventives à l'égard des maladies humaines ou animales, ainsi que tout produit pouvant être administré à l'homme ou à l'animal en vue d'établir un diagnostic médical ou de restaurer, corriger ou modifier ses fonctions organiques* ».

En d'autres mots plus simples : un médicament est une substance utilisée pour soigner les maladies chez les êtres humains et les animaux, en les traitant ou en les prévenant ; parfois utilisée pour diagnostiquer des maladies ou améliorer le fonctionnement corporel en cas de dysfonctionnement ou de problème de santé.

Par exemple, le paracétamol est souvent utilisé pour soulager la douleur et abaisser la fièvre, tandis que le gadolinium est une substance injectée avant une IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) pour améliorer la visibilité des parties du corps lors d'examens d'imagerie médicale, qui peuvent détecter les cancers, inflammations ou lésions².

2.2.2. Composition des médicaments

Un médicament se compose³ de deux types de composants principaux : le principe actif et l'excipient.

2.2.2.1. Le principe actif

Il s'agit de l'élément qui a un effet thérapeutique et qui est en charge de l'efficacité pharmacologique du médicament, en traitant les maladies ou les symptômes, et en les soulageant ou les prévenant⁴.

¹ Touitou, Y. (2007). Introduction aux médicaments : définitions et buts de la pharmacologie. Dans Pharmacologie (11e éd., chap. 1). Elsevier Masson.

² Mellot, F. (s. d.). Tout savoir sur les produits de contraste. Hôpital Foch. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.hopital-foch.com/contenus-medicaux/tout-savoir-sur-les-produits-de-contraste/>

³ Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités, et des Familles. (2022, 16 mars). Qu'est-ce qu'un médicament ? Santé.gouv.fr. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://sante.gouv.fr/soins-et-maladies/medicaments/le-bon-usage-des-medicaments/article/qu-est-ce-qu-un-medicament#:~:text=5111-1>

⁴ Ibid.

2.2.2.2. L'excipient

Il s'agit de composés qui n'ont pas de propriétés thérapeutiques directes, mais qui sont utilisés pour¹ :

- contribuer à rendre la fabrication des médicaments plus simple ;
- assurer que les médicaments restent stables et soient bien préservés ;
- améliorer la saveur et l'apparence des médicaments ou rendre leur digestion plus facile.

À titre d'exemple, les excipients peuvent être : lactose, substance amylacée (amidon), gélatine alimentaire, traces colorées et saveurs variées.

Un médicament peut aussi renfermer un additif. Nous mentionnons ceci comme une forme d'excipient, car un additif peut fonctionner comme un excipient ; cependant, l'inverse n'est pas toujours vrai.

Selon Gurung, Anjudikkal et Pulikkal², un additif médicamenteux se réfère à un genre d'agent auxiliaire incorporé pour améliorer divers aspects de la composition médicamenteuse, tels que :

- la couleur (pigment) ;
- l'odeur (parfum) ;
- la conservation (agent de conservation) ;
- ou la texture.

Dans le tableau numéro deux (adapté de Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités, et des Familles, op. cit.), et d'après les définitions précédentes, nous allons résumer les principales différences entre les trois composants essentiels d'un médicament.

¹ Ibid.

² Gurung, J., Anjudikkal, J., & Pulikkal, A. K. (2020, 15 novembre). Systèmes amphiphiles médicament-additif dans des milieux mixtes solvant-eau aqueux et organiques : un compte rendu complet des propriétés physico-chimiques. *Journal des liquides moléculaires*, v. 318.

Tableau 2 : Tableau comparatif des composants d'un médicament

Nom	Définition	Fonction principale	Effet thérapeutique ?	Exemples
Principe actif	Substance chimique ou naturelle qui agit sur le corps pour soigner une maladie	Soigner, soulager ou prévenir une maladie	Oui	Paracétamol (antidouleur), Amoxicilline (antibiotique)
Excipient	Substance sans effet thérapeutique, utilisée pour fabriquer le médicament	Donner la forme (comprimé, sirop...), faciliter l'absorption, conserver	Non	Lactose, amidon, cellulose, eau purifiée
Additif (type d'excipient)	Excipient particulier utilisé pour améliorer certaines caractéristiques	Améliorer le goût, la couleur, l'odeur, la conservation	Non	Arômes, édulcorants, colorants, conservateurs

Source : Adapté de (Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités, et des Familles, op. cit.)

2.2.3. Origine des médicaments

L'origine d'un médicament¹ est définie à travers l'origine de ses principes actifs, qui peuvent être fournies par trois sources naturelles (végétale, animale et minérale).

2.2.3.1. Médicaments d'origine végétale

Les plantes sont utilisées en phytothérapie² depuis des temps anciens, et il est possible de recourir aux plantes entières ou aux extraits qu'elles procurent³.

¹ Touitou, op. cit.

² La phytothérapie (Naturactive, s.d.) consiste à utiliser des plantes médicinales pour traiter ou améliorer la santé globale.

³ Talbert, M., Willoquet, G., & Gervais, R. (2009). *Le guide pharmaco clinique*. Wolters Kluwer.

Exemple : La morphine, selon l'Organisation mondiale de la santé¹, elle est définie comme un médicament puissant couramment prescrit pour atténuer les douleurs intenses. Elle est dérivée du pavot à opium².

2.2.3.2. Médicaments d'origine animale

Leur usage remonte aussi loin que celui des végétaux. L'utilisation d'organes ou de glandes³ fraîches à la fin du 19e siècle a introduit l'opothérapie⁴ sur le devant de la scène⁵.

Exemple : La trypsine est une enzyme naturelle produite par le pancréas. Elle aide à la digestion des protéines et peut être utilisée en médecine ou en laboratoire.

2.2.3.3. Médicaments d'origine microbiologique

Certains types de petits organismes⁶ utilisés de manière appropriée produisent divers composés bénéfiques pour la santé humaine. Les antibiotiques⁷ sont parmi les plus importants et ont révolutionné le traitement des infections virales et bactériennes⁸.

¹ Organisation mondiale de la santé. (2023, 29 août). *Surdose d'opioïdes*. Organisation mondiale de la santé. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/opioid-overdose>

² Le pavot à opium (Techno-Science.net, 2025) est une plante (nom scientifique : *Papaver somniferum*) dont la sève est utilisée pour fabriquer des composés tels que l'opium, la morphine ou la codéine.

³ Les glandes (Larousse, s. d.), telles que la thyroïde ou les glandes surrénales, sont des organes du corps qui produisent et sécrètent des substances comme les hormones.

⁴ Le traitement par opothérapie est une pratique ancienne qui recourt à des extraits de glandes animales afin de traiter diverses affections chez l'être humain.

⁵ Talbert, op. cit.

⁶ Les micro-organismes (Larousse, s. d.) désignent des êtres vivants microscopiques, tels que les bactéries ou les virus, visibles uniquement au microscope. Certains peuvent entraîner des maladies chez les humains et d'autres organismes, tandis que d'autres peuvent également être bénéfiques (par exemple dans la production d'antibiotiques).

⁷ Les antibiotiques (Larousse, s. d.) sont des médicaments conçus pour éliminer ou freiner la reproduction des bactéries responsables d'infections.

⁸ Talbert, op. cit.

2.2.3.4. Médicaments d'origine minérale

L'usage de ces éléments¹ remonte à une époque lointaine, antérieure à l'avènement de la chimie organique².

Les principes actifs ou les excipients de médicaments sont fréquemment employés à cet effet.

Exemples : argiles minérales naturelles³ reconnues pour leurs propriétés bénéfiques sur la peau et les cheveux ; le pidolate⁴ de magnésium et le chlorure⁵ de sodium sont également couramment utilisés dans des produits de soin⁶.

2.2.3.5. Médicaments d'origine biotechnologique

Il est question ici⁷ de techniques de synthèse⁸ avancées qui font principalement appel à des méthodes de biologie moléculaire⁹.

¹ Talbert, op. cit.

² La chimie organique (Larousse, s. d.) est un domaine de la science chimique qui se consacre à l'étude des molécules contenant du carbone. Elle est largement exploitée dans le développement de médicaments.

³ Les minéraux argileux naturels (Larousse, s. d.) sont des composés extraits du sol, parfois employés en pharmacie pour leur capacité à absorber les toxines ou à protéger l'estomac.

⁴ Le pidolate est un type de sel chimique (souvent à base de magnésium ou de zinc), utilisé dans les compléments nutritionnels pour favoriser l'assimilation de ces minéraux.

⁵ Le chlorure (Larousse, s. d.) est une forme de sel chimique (comme le sel de table, à base de chlorure de sodium). Certains types de chlorures sont utilisés comme médicaments ou suppléments dans diverses applications médicales et nutritionnelles.

⁶ Talbert, op. cit.

⁷ Talbert, op. cit.

⁸ Les méthodes de synthèse sont des procédés employés pour créer des molécules ou des médicaments en laboratoire à partir de matières premières.

⁹ La biologie moléculaire (Larousse, s. d.) est une discipline scientifique qui étudie les molécules présentes à l'intérieur des cellules, telles que l'ADN ou les protéines, afin d'approfondir la compréhension des maladies et de favoriser les avancées dans le domaine des traitements médicaux.

2.2.4. Formes pharmaceutiques et voies d'administration

Les formes de médicaments, appelées aussi formes galéniques, font référence aux différentes apparences physiques par lesquelles un traitement est donné au patient. Elles assurent une distribution efficace et sûre du principe actif pour garantir sa stabilité et son efficacité¹.

La répartition de celles-ci se fait globalement en trois classes principales : solides, semi-solides, liquides. Elle inclut aussi d'autres formes précises telles que les formes gazeuses et injectables².

Dans le tableau numéro trois (adapté de Liguori, op. cit.; Vidal, op. cit.), nous allons présenter les principales formes pharmaceutiques.

Tableau 3 : Tableau explicatif des différentes formes pharmaceutiques³

Forme pharmaceutique	Description simple	Voie d'administration	Quand l'utiliser / Particularité
Comprimé	Petit disque solide à avaler	Orale (par la bouche)	Utilisé pour de nombreux traitements ; facile à stocker et à doser
Gélule / Capsule	Enveloppe contenant une poudre ou un liquide	Orale	Mieux tolérée que les comprimés, masque les goûts désagréables
Sirop / Solution buvable	Liquide à boire	Orale	Idéal pour les enfants ou les personnes ayant du mal à avaler
Pommade / Crème / Gel	Produit à appliquer sur la peau	Cutanée (sur la peau)	Utilisé pour traiter des problèmes locaux (brûlures, eczéma, etc.)
Patch transdermique	Autocollant diffusant un médicament	Cutanée	Libère le médicament lentement dans le corps (ex : nicotine)
Injection (piqûre)	Liquide injecté avec une seringue	Parentérale (intramusculaire, intraveineuse, etc.)	Action très rapide ou quand la voie orale est impossible
Suppositoire	Petit bâtonnet inséré dans le rectum	Rectale	Utilisé en cas de vomissements ou pour un effet local
Ovule	Capsule insérée dans le vagin	Vaginale	Traitement local pour infections gynécologiques
Aérosol / Inhalateur	Spray à respirer	Inhalation	Pour les maladies respiratoires (asthme, BPCO)
Gouttes	Liquide à instiller	Ophtalmique (yeux), auriculaire (oreilles), nasale (nez)	Action locale rapide sur la zone concernée

Source : Adapté de (Liguori, op. cit.; Vidal, op. cit.)

¹ Liguori, G. (2016). *Les formes pharmaceutiques. Pharmacien hospitalier – CH M Despinoy, IFSI 1re année*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://promotion20162019.files.wordpress.com/2016/10/les-formes-pharmaceutiques.pdf>

² VIDAL. (2021, 13 avril). *Les différentes formes de médicaments*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.vidal.fr/medicaments/utilisation/regles-bon-usage/formes-medicament.html>

³ La voie d'administration désigne ici la méthode de consommation ou d'utilisation du médicament.

2.3. Généralités sur les formes pharmaceutiques solides

Selon plusieurs auteurs¹, les médicaments de formes solides sont définis tout simplement comme des médicaments secs², contrairement aux médicaments liquides. Ils se conservent mieux car ils ne réagissent pas facilement avec d'autres substances comme le feraient des liquides. En plus, ils permettent de masquer plus facilement le mauvais goût des principes actifs.

2.3.1. Principes actifs de la forme solide

Le principe actif est un élément crucial qui favorise la guérison ou agit dans le traitement médical d'un médicament solide en raison de ses propriétés essentielles telles que la bonne fluidité nécessaire à son bon fonctionnement. En l'absence de ces caractéristiques requises chez le principe actif (PA), l'introduction d'autres composants appelés "excipients" devient nécessaire pour garantir l'obtention de ces propriétés clés³.

Le tableau numéro quatre (adapté de Levacher, op. cit.) présente les différentes caractéristiques nécessaires d'un principe actif dans divers médicaments sous forme solide.

Tableau 4 : Les caractéristiques nécessaires du PA selon le type de médicament solide

Forme galénique	Qualités nécessaires du principe actif (PA)
Poudre	Bon écoulement, faible pouvoir électrostatique, taille homogène des particules.
Granulés	Bon écoulement, peu hygroscopique (absorbe peu d'eau), peu sensible à la chaleur.
Gélules	Bon écoulement, bonne aptitude au tassement (remplissage facile).
Comprimés	Bon écoulement, bonne aptitude à la compression, non abrasif.

Source : Adapté de (Levacher, op. cit.)

¹ Levacher, E. (2016, 1 juillet). *PHI 41 Pharmacotechnie industrielle* (3e éd.). Institut des Métiers et des Technologies.

² Par exemple : comprimés, gélules, poudres

³ Ibid.

2.3.2. Excipients de la forme solide

Les ingrédients supplémentaires inclus dans ce type de médicament servent à¹ :

- améliorer l'efficacité de la production ;
- améliorer l'efficacité d'un traitement pharmacologique. ;
- améliorer le goût du médicament et le rendre plus agréable à prendre.

Le tableau numéro cinq (adapté de Levacher, op. cit.) montre les différents rôles des excipients en expliquant brièvement l'utilité de chacun.

Tableau 5 : Les rôles des excipients

Rôle	Utilité	Exemples courants
Diluants	Remplissent le médicament quand il y a peu de principe actif.	Amidon, sucre, cellulose
Liants	Aident les particules à coller entre elles.	Sucre, gomme, povidone
Agents de désagrégation	Aident à dissoudre le comprimé rapidement dans le corps.	Amidon modifié, acide alginique
Lubrifiants	Évitent que le comprimé colle aux machines, donnent un bel aspect.	Talc, agents antiadhésifs
Agents d'enrobage	Protègent le médicament, facilitent la prise.	Filmogènes, plastifiants
Correcteurs de goût	Masquent le goût désagréable du médicament.	Arômes, édulcorants
Adjuvants	Stabilisent ou renforcent l'effet du médicament.	Conservateurs, absorbants

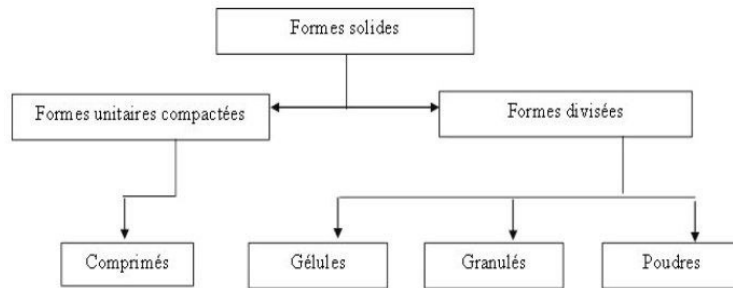
Source : Adapté de (Levacher, op. cit.)

¹ Ibid.

2.3.3. Types de formes pharmaceutiques solides

La figure numéro huit¹ représente un schéma incluant les différentes formes pharmaceutiques solides.

Figure 8 : Les différentes formes pharmaceutiques solides



Source : (Ibid., p. 5-6)

En expliquant ce schéma, concernant les formules médicamenteuses solides, on identifie deux catégories principales :

- formes compactées unitaires : une dose unique est préparée de manière condensée ;
- formes fractionnées : la médication est répartie en quantités plus petites (par exemple des sachets ou des cuillères mesurées).

La présentation pharmaceutique individuelle concerne le comprimé ; les autres formes comprennent :

- **Poudres²** : Ces fines particules renferment des principes actifs (substances thérapeutiques), pouvant être simples ou mélangées à d'autres poudres inertes pour faciliter leur absorption par voie orale. Généralement aromatisées pour une meilleure saveur et tolérance lors de la prise en charge médicamenteuse. Il est recommandé de les diluer dans de l'eau ou une autre boisson avant ingestion.

¹ Berrahmoun, Y., & Hammoudi, M. (2020). *Optimisation du procédé de fabrication d'une forme pharmaceutique sèche en vue d'améliorer son homogénéité et sa dissolution* [Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida].

² Le Hir, A., Chaumeil, J.-C., & Brossard, D. (2009). *Pharmacie galénique : Bonnes pratiques de fabrication des médicaments* (9e éd.). Elsevier Masson.

- **Granulés¹** : Ce sont de petits grains secs fabriqués à partir de poudres afin de les rendre plus maniables et plus solides que les poudres seules, pour une utilisation médicale optimale avec une stabilité accrue et une facilité de dosage améliorée par rapport aux poudres simples initiales ; leur taille peut varier quelque peu en fonction du processus de fabrication et présenter des variations dans la porosité (avec de petits orifices).
- **Capsules²** : Les capsules représentent des contenants en gélatine couramment utilisés pour administrer des médicaments de manière précise et contrôlée. Cette forme pharmaceutique peut être soit rigide, soit souple et renferme une quantité spécifique de médicament sous forme de poudre, liquide ou pâte. La coque protectrice assure la préservation du médicament jusqu'à son arrivée à l'estomac ou à l'intestin, là où elle se dissout pour libérer sa substance active. Cette méthode permet d'éviter toute altération prématurée du principe actif due à l'acidité gastrique.

2.3.4. Le comprimé : forme pharmaceutique solide majeure

Le médicament en comprimé est une petite unité solide (similaire à une pilule) destinée à être ingérée et renfermant une ou plusieurs substances actives (SA/PA). Ces substances sont comprimées ensemble sous forme de poudre afin de former un volume uniforme. Généralement prévus pour être avalés par voie orale³.

2.3.4.1. Types de comprimés

Il y a diverses sortes de comprimés qui sont tous fabriquées pour distribuer le médicament de manière variée.

Le tableau numéro six (adapté de Berrahmoun, op. cit., p. 5-11) présente les divers types de comprimés en détaillant les fonctions de chacun, à titre illustratif :

- Un médicament à libération prolongée agit lentement dans l'organisme (sur une longue durée).

¹ Ibid.

² Levacher, op. cit.

³ Allo, O., Blanc, P., & Dalmaso, M.-A. (2013, 14 mars). *Pharmacie galénique B.P.* (3e éd.). Wolters Kluwer.

Tableau 6 : Types de comprimés

Type de comprimé	Explication
Comprimé à action immédiate	Il agit tout de suite après avoir été avalé.
Comprimé à action retardée	Il n'agit qu'après un certain changement dans le corps (comme une variation du pH).
Comprimé à action prolongée	Il libère le médicament lentement, pendant une longue période.
Comprimé soluble	Il doit être dissous dans de l'eau avant d'être pris.
Comprimé dispersible	Il se mélange dans l'eau pour former une suspension, avant de le boire.
Comprimé effervescent	Il fait des bulles dans l'eau, puis on le boit.
Comprimé masticable	On le mâche avant de l'avaler.
Comprimé buccal et sublingual	Il se place dans la bouche, souvent sous la langue, pour agir localement ou passer dans le sang.
Comprimé à désintégration orale	Il fond dans la bouche sans besoin d'eau.

Source : Adapté de (Berrahmoun, op. cit., p. 5-11)

2.3.4.2. Avantages

Les comprimés sont couramment utilisés pour diverses raisons, parmi lesquelles (Allo, op. cit. ; traduit de GAD, 2008¹) :

- On peut les créer de diverses manières pratiques ;
- Ils sont simples à ingérer, car leur petite taille permet de les prendre de différentes manières ;
- Ils sont peu coûteux à fabriquer en grande quantité ;
- Le dosage est soigneusement mesuré et constant pour assurer que chaque comprimé contient précisément la quantité appropriée de médicament ;
- Ils peuvent être utilisés indépendamment et ne nécessitent pas l'intervention d'un spécialiste de la santé ;
- Ils sont plus solides (plus robustes face aux chocs et à la chaleur, et plus résistants aux bactéries) que les médicaments sous forme liquide ;

¹ Gad, S. C. (2008, 17 mai). *Pharmaceutical manufacturing handbook: Production and processes*. Wiley-Interscience.

- Ils veillent à la préservation adéquate des ingrédients actifs pour une conservation aisée ;
- Il est possible d'ajuster leur fonctionnement pour qu'ils agissent avec une lenteur accrue ou uniquement à des instants spécifiés (comme dans le système digestif).

2.4. Fabrication d'un médicament sous forme de comprimé

La production d'un médicament solide tel qu'un comprimé varie en fonction du type de comprimé fabriqué. Prenons le cas du Doliprane : le comprimé destiné à être ingéré directement n'a pas besoin d'avoir un goût agréable ; en revanche le comprimé effervescent (de type gazeux) doit avoir un goût acceptable pour faciliter sa prise en main.

La figure numéro neuf (adaptée de France, Franceinfo, 2025)¹ illustre l'exemple mentionné.

Figure 9 : Distinction entre deux types différents de comprimés



Source : Adapté de (France, op. cit., 2025)

2.4.1. Étapes du procédé de fabrication

Dans ce contexte, nous allons aborder les étapes essentielles de la fabrication d'un médicament sous forme de comprimé, quel que soit son type.

¹ France, H. (2025, 12 mars). *Challenge sur les réseaux sociaux ou pas... La prise de paracétamol en trop grande quantité est dangereuse*. Franceinfo. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://france3-regions.franceinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/alpes-maritimes/nice/challenge-sur-les-reseaux-sociaux-ou-pas-la-prise-de-paracetamol-en-trop-grande-quantite-est-dangereuse-3120643.html>

2.4.1.1. Étape 1 : Préparation des matières premières

Cette préparation implique deux actions cruciales :

► Préparation des doses (Pesée)¹: l'objectif est de réaliser une mesure précise des différentes quantités de chaque composant (principe actif et excipients), nécessaires à la fabrication d'une série de comprimés, que ce soit dans la zone de stockage ou dans la zone de production.

La figure numéro dix illustre une salle de pesée pharmaceutique.

Figure 10 : Exemple d'une salle de pesée



Source : (Made-in-China, s. d.)

Les espaces de pesage sont classés comme des zones à environnement contrôlé selon les bonnes pratiques de fabrication (BPF). Par conséquent il est crucial de surveiller la température, l'humidité, la pression et le degré de propreté (particules, contamination croisée).

► Contrôle de la qualité des ingrédients² : le but est de vérifier que chaque ingrédient (principes actifs et excipients) répond aux normes pharmaceutiques nécessaires avant leur utilisation.

¹ ANSM, op. cit.

² Ibid.

2.4.1.2. Étape 2 : Mélange et/ou granulation

Cette étape dépend généralement de la nature des matières premières (principes actifs et excipients) et se divise en trois méthodes principales : la granulation¹ sèche, la granulation humide et la compression directe.

► La compression directe² : il s'agit d'une approche basique, mais elle requiert des poudres d'excellente qualité pour les ingrédients actifs ainsi que pour les excipients utilisés.

Elle entame le processus en pesant et en combinant les éléments (substances actives PA et excipients fonctionnels). Ensuite vient l'étape de la lubrification où un lubrifiant comme le stéarate de magnésium est ajouté pour diminuer la friction et faciliter la compression directement sans passer par une étape de granulation.

► La granulation humide³ : il s'agit de l'approche la plus fréquemment adoptée. Elle prend les étapes suivantes :

- commençant par la mesure et le mélange des poudres (substances actives et excipients);
- ensuite, nous incorporons un agent de liaison liquide tel que de l'alcool ou de l'eau purifiée pour unir les particules ;
- nous mélangeons les ingrédients humides jusqu'à obtention d'une pâte uniforme ;
- nous filtrons cette pâte à travers un tamis pour créer des grains ;
- après ces Les grains sont séchés puis à nouveau passés au tamis pour assurer une taille uniformément granuleuse ;
- nous faisons un dernier mélange avec d'autres substances comme des agents lubrifiants ;
- et enfin, nous pressons les granulés pour créer les pilules.

¹ La granulation désigne le processus de transformation des poudres en formules granulées ou en grains.

² Mahato, R. I., & Narang, A. S. (2012). *Pharmaceutical dosage forms and drug delivery* (2e éd.). CRC Press.

³ Ibid.

► La granulation sèche¹ : cette technique est employée pour des poudres sensibles à la température. Il est difficile d'humidifier ou de compresser ces poudres, car elles sont extrêmement fines et peu collantes.

Le processus débute toujours avec le pesage et le mélange des poudres. Ensuite intervient la compression des poudres grâce à des rouleaux, par exemple, pour les façonner en plaques ou en briques compactes.

Les briques sont par la suite réduites en grains qui sont ensuite passés au tamis pour ajuster leur taille. Ensuite, nous effectuons un dernier mélange avec des adjuvants (tels que des agents de lubrification), avant de procéder à la compression définitive.

Figure 11 : Matériels utilisés dans le mélange et la granulation humide/sèche



Dans le tableau numéro sept (adapté de Bouillon-Camara, A.-L, 2005)², nous allons examiner les disparités entre chaque approche tout en exposant les bénéfices et les inconvénients respectifs.

¹ Ibid.

² Bouillon-Camara, A.-L. (2005). *Extrapolation du procédé de granulation humide en mélangeur haute vitesse* [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine].

Tableau 7 : Comparaison entre les trois techniques : granulation à sec et humide ainsi que le mélange à sec

Méthode	C'est quoi ?	Quand l'utiliser ?	Avantages	Inconvénients
Mélange à sec	On mélange les poudres telles quelles, sans eau ni liant.	Quand les poudres sont faciles à mélanger et se compressent bien.	- Rapide et simple - Pas besoin de sécher les poudres	- Risque de mauvais mélange - Comprimés moins solides
Granulation humide	On ajoute un liquide (liant) pour coller les poudres entre elles.	Quand les poudres sont légères, très fines ou le principe actif est en petite quantité.	- Mélange très homogène - Poudres plus faciles à manipuler	- Nécessite un séchage - Ne convient pas aux poudres sensibles à l'eau
Granulation sèche	On presse les poudres à sec pour former des morceaux, puis on les broie.	Quand les poudres sont sensibles à l'eau ou à la chaleur.	- Pas besoin de liquide ni de chaleur - Poudres plus denses	- Mélange parfois moins homogène - Peut nécessiter plusieurs passages

Source : Adapté de (Bouillon-Camara, A.-L, op. cit.)

2.4.1.3. Étape 3 : Compression

La compression implique de produire un comprimé soit en compressant directement un mélange de poudres (compression directe), soit à partir d'un granulé obtenu par granulation sèche ou humide¹.

Le fonctionnement de la compression est le suivant²: une matrice est déplacée par un poinçon inférieur pour former une cavité (la chambre de dosage), dans laquelle on insère des granulés. Un poinçon supérieur vient ensuite fermer cette cavité et comprimer les granulés avec le poinçon inférieur jusqu'à obtenir un comprimé.

Après, le poinçon situé en haut est retiré tandis que le poinçon inférieur se soulève pour éjecter le comprimé.

Il y a deux catégories de dispositifs de compression³ :

- Options de compression de machines alternatives.

¹ Levacher, op. cit.

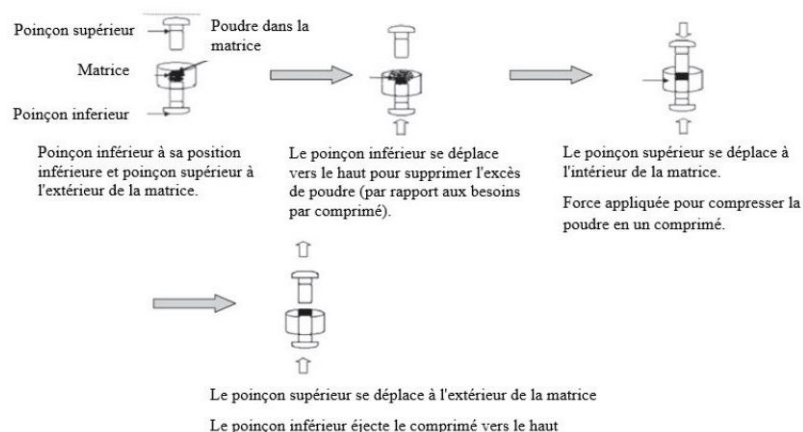
² Ibid.

³ Ibid.

- Machines pour comprimer rotatives.

Le schéma illustré dans la figure numéro douze (Berrahmoun, op. cit., p. 5-11) montre le déroulement d'un processus de compression.

Figure 12 : processus de compression



Source : (Berrahmoun, op. cit., p. 5-11)

Après cette phase vient une étape supplémentaire, si nécessaire : il s'agit de l'enrobage des médicaments afin de les recouvrir de manière adéquate pour leur conservation et leur utilisation optimale.

Nous distinguons deux types d'enrobages : l'enrobage entérique et le pelliculage, dont nous détaillons les différences dans le tableau numéro huit (adapté de Mahato, op. cit.).

Tableau 8 : Différences entre l'enrobage entérique et le pelliculage

Aspect	Enrobage entérique	Pelliculage
Où le médicament agit ?	Dans l'intestin (pas dans l'estomac)	Dès qu'il est avalé (souvent dans l'estomac)
Pourquoi on l'utilise ?	Protéger le médicament ou éviter d'abîmer l'estomac	Masquer le goût, protéger de l'humidité, rendre joli
Aspect visible	Enrobage plus épais, souvent brillant	Film fin et coloré

Source : Adapté de (Mahato, op. cit.)

2.4.1.4. Étape 4 : Conditionnement

Le conditionnement est la phase finale du processus de fabrication des médicaments, au cours de laquelle les comprimés sont insérés dans des emballages adaptés pour garantir leur protection et faciliter leur distribution¹.

Les objectifs de cette étape comprennent² :

- la protection des médicaments contre l'humidité et la lumière excessive ainsi que contre tout contact avec l'air et les chocs, pour éviter toute contamination microbienne ;
- l'utilisation concrète : faciliter et assurer une prise en charge sécurisée des patients (par exemple : étuis à pilules et flacons doseurs).

Les divers types de conditionnement sont³ :

- Conditionnement primaire : en contact physique direct avec le médicament, tel que les emballages en blister-packaging ou les tubes.
- Conditionnement secondaire : inclut l'emballage d'origine (comme une boîte en carton).
- Conditionnement du troisième niveau : utilisé pour déplacer des charges lourdes, telles que des boîtes d'expédition sur palettes.

2.4.2. Contraintes réglementaires et qualité pharmaceutique

D'après les règles de l'ISO⁴, la qualité est définie comme « *l'ensemble des caractéristiques d'une entité lui permettant de répondre aux besoins exprimés et implicites d'un client* ».

¹ Levacher, op. cit.

² Ibid.

³ Ibid.

⁴ Feinberg, M. (2001). *L'assurance qualité dans les laboratoires agroalimentaires et pharmaceutiques* (2e éd., pp. 2–3). Édition Tec & Doc.

Selon les Bonnes Pratiques de Fabrication européennes¹, lorsque l'on évoque la “qualité du médicament”, on se réfère à la qualité requise pour satisfaire les besoins des patients, en d'autres termes : la qualité stipulée dans le dossier de demande d'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM).

Les objectifs du contrôle de qualité² consistent à assurer que les caractéristiques des matières premières et des produits finaux respectent toujours des normes prédéfinies et à participer au traitement des alertes de santé publique.

2.4.2.1. Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF)

Dans le domaine pharmaceutique en France, le premier document officiellement rédigé en français concernait les Bonnes Pratiques de Fabrication. Il fut créé afin de répondre à une demande de l'Organisation mondiale de la santé, adressée à tous les pays industrialisés pour assurer la qualité des médicaments exportés à l'étranger³.

Les Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF)⁴ doivent être perçues comme des conseils ou des recommandations à appliquer de manière optimale selon chaque contexte spécifique. Elles se déclinent en différents chapitres qui servent de fondement au document ; ces bonnes pratiques garantissent que les médicaments sont produits selon des normes de qualité et que leur fabrication est enregistrée et surveillée.

Les Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF)⁵ demeurent indispensables même en présence d'un laboratoire de contrôle afin de réduire les risques inhérents à toute fabrication pharmaceutique, qui ne peuvent être totalement éliminés par l'examen du produit finalement obtenu. En l'absence

¹ Le Hir, op. cit.

² Hulse, J. H. (2008). *Développement durable : un avenir incertain* (pp. 305–312). Les Presses de l'Université Laval.

³ Le Hir, op. cit.

⁴ Ibid.

⁵ Kopp-Kubel, S. (1998). *Good Manufacturing Practices (GMP) in Pharmaceutical Production* (pp. 45–47). Organisation mondiale de la santé.

des BPF, il devient incertain que chaque médicament fabriqué possède la même qualité que les autres.

2.4.2.2. Aspect réglementaire

En Algérie, le ministère de la Santé s'est fixé des objectifs dans le domaine de l'amélioration des hôpitaux, parmi lesquels¹ :

- La simplification des produits à travers la classification nationale considère l'idée des médicaments indispensables.
- La disponibilité de médicaments de qualité avec des normes de sécurité élevées et une efficacité satisfaisante est essentielle pour assurer un accès adéquat à ces traitements.
- La promotion d'une industrie pharmaceutique nationale prospère.

Il existe une réglementation détaillée en Algérie concernant les produits pharmaceutiques destinés à un usage humain, qui définit rigoureusement les exigences et les normes à respecter lors de la fabrication des médicaments, ainsi que pour leur importation et leur distribution sur le marché².

Le livre de règles destiné aux professionnels de la santé, « la Pharmacopée européenne », joue un rôle crucial dans le domaine de la santé publique en établissant des normes pour la qualité des médicaments et de leurs ingrédients, offrant ainsi une référence fiable et un modèle à suivre.

Ses activités favorisent également une concurrence plus équitable entre les secteurs industriels en s'établissant sur des normes de santé communes établies par une convention internationale sous l'autorité du Conseil de l'Europe³.

Le but de la Pharmacopée européenne est de contribuer à la préservation de la santé publique en rédigeant des monographies claires détaillant les caractéristiques des impuretés admissibles

¹ Mansouri, M. (2008, 28–30 avril). *Réglementation, qualité et problématiques des médicaments : Expérience algérienne* [Conférence]. Conférence sur les systèmes de santé en Afrique, Ministère de la Santé, de la Population et de la Réforme Hospitalière, OMS AFRO, Ouagadougou, 3–5.

² Ziani, L. (2021). *L'industrie du médicament en Algérie : État des lieux et contraintes*. *Revue Abaad Iktissadia*, 11, 419–443.

³ Artiges, A. (2006). *La pharmacopée européenne et la direction européenne de la qualité du médicament au Conseil de l'Europe*. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 190(9), 1903–1911.

et leurs seuils limites. Cet ouvrage s'agit¹ d'un code professionnel conçu pour garantir la qualité des produits pharmaceutiques.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de poser les bases essentielles à la compréhension des mécanismes de la production industrielle, tout en mettant en évidence les spécificités propres à la production pharmaceutique. Ce secteur, fortement encadré et exigeant, nécessite une organisation rigoureuse, des méthodes adaptées et l'intégration de technologies avancées pour garantir la qualité, la sécurité et l'efficacité des produits. Cette analyse constitue une étape préalable indispensable à l'étude de la digitalisation et de l'intégration des technologies telles que l'Internet des objets dans les processus de production pharmaceutique.

¹ Partouche, D. (2016, 4 octobre). *Édition 2017 de la Pharmacopée européenne*. Université de Paris. Consulté le 25 avril 2025 sur <https://numerabilis.u-paris.fr/medica/blog/index.php/pharmacopee-europeenne-2017/>

Chapitre 2

*L'Industrie 4.0 et l'Internet des Objets
dans la production industrielle*

Introduction

Dans un monde développé industriellement et transformé par les différentes révolutions industrielles ayant influencé les processus de production humaine au fil des années ; de la production manuelle, à l'introduction des machines, jusqu'à l'arrivée de l'automatisation et de la numérisation, émerge le concept bien connu de l'industrie 4.0. Celle-ci repose sur l'intégration de différentes technologies digitales déjà existantes, que l'industrie 4.0 remet en usage. Elle combine ces technologies les unes avec les autres au sein des processus de production des entreprises industrielles, appelées aussi "*entreprises intelligentes*".

Les technologies intégrées dans l'industrie 4.0 ont révélé que la plupart des erreurs provenaient de l'humain, bien qu'il subsiste des erreurs techniques. Les erreurs humaines étaient un grand défi, donc cette automatisation non seulement a réduit les erreurs humaines, mais aussi optimisé les coûts de production, amélioré la productivité et la qualité, et permis de gagner du temps.

Dans ce chapitre, nous allons développer deux sections : la première mettra en lumière la quatrième révolution industrielle, qui a propulsé le monde vers la numérisation, et la deuxième portera sur l'une des technologies les plus importantes ayant explosé avec cette révolution, l'internet des objets.

Section 1 : Fondements, évolution et piliers technologiques de l'Industrie 4.0

Dans cette section, nous allons mentionner les concepts principaux du terme industrie, sa définition selon plusieurs auteurs et son origine. Après, nous allons présenter de chaque révolution industrielle, de la révolution mécanique, l'industrie 1.0, à l'ère de l'interaction homme-machine, l'industrie 5.0, la dernière révolution industrielle pour le moment. Pour conclure ce chapitre, nous présenterons les principes essentiels et les technologies clés de l'industrie 4.0.

1.1. Origine et évolution du concept d'industrie

L'industrie est l'ensemble des activités économiques qui ont pour but de transformer des ressources naturelles en vue de produire des biens finis ou semi-finis. Elle constitue le secteur secondaire dans la division classique des secteurs économiques (Bouron, Géo confluences, 2023).

Le mot "industrie" provient du latin « *industria* », qui signifie¹ « *activité* », « *art* », mais aussi « *habileté à faire quelque chose* ». Son étymologie renvoie² aux notions de construction, d'organisation et d'ingéniosité.

Jusqu'au XVIIIe siècle, le terme "industrie" s'était défini³ en se basant sur les moyens et les matériaux utilisés pour accomplir des objectifs économiques, tout en restant synonyme de la notion d'économie. Donc, avant d'être défini complètement, le terme "industrie" a traversé un processus d'évolution long et compliqué.

¹ Bouron, J.-B. (2023, mai). *Industrie*. Géo Confluences. Consulté le 2 mars 2025 sur <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/industrie>

² Caliste, L., & Carnino, G. (2022). *Qu'est-ce que l'industrie ?* OpenEdition Journals, 2022, 219–242. Consulté le 1 mars 2025 sur <http://journals.openedition.org/artefact/13273>

³ Flacher, D., & Pelletan, J. (2007). *Le concept d'industrie et sa mesure : origines, limites et perspectives – Une application à l'étude des mutations industrielles*. *Économie et statistique*, 405(1), 13–46.

À partir des années 1860, la définition de l'industrie s'est détachée des matériaux utilisés pour se concentrer sur la destination des produits élaborés, afin de mieux comprendre les opportunités sur le marché. Par la suite, les nomenclatures ont été intégrées aux dossiers de fabrication des activités industrielles au sein des entreprises¹.

Selon le Dictionnaire de Trévoux, l'industrie est liée à la « *dextérité, l'invention et l'adresse* ». Dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, le terme fait surtout référence à une expertise plutôt qu'à un domaine économique.

Il existait aussi une opposition entre industriels et artisans, qui s'est institutionnalisée en pleine industrialisation, notamment dans les années 1930 en Europe. Les couples d'oppositions se sont formés de la façon suivante² :

- travail manuel vs mécanisation ;
- spécialisation artisanale vs production industrielle de masse ;
- unité des tâches vs division du travail ;
- indépendance de l'artisan vs prolétarianisation de l'ouvrier ;
- méthodes traditionnelles vs processus innovants ;
- production locale vs marché global.

Colin Clark³ définit l'industrie comme un processus utilisant des matières premières pour produire des biens transportables à grande échelle. Selon lui, l'industrie se caractérise par des investissements élevés en capital, un haut degré d'organisation et des rendements d'échelle croissants.

De la même façon, l'Institut national de la statistique et des études économiques⁴ en France définit l'industrie comme la totalité des activités économiques qui utilisent différents facteurs

¹ Ibid, p. 13-46.

² Ibid.

³ Clark, C. (1940). *The productivity of secondary industry*. Dans *The Conditions of Economic Progress* (pp. 275–318). London : Macmillan and Co. Limited.

⁴ INSEE. (2021, 11 février). *Industrie : définition*. Institut National de la Statistique et des Études Économiques. Consulté le 2 mars 2025 sur <https://tinyurl.com/3phs94vd>

de production (infrastructures, fournitures, travail, expertise) pour produire des biens tangibles destinés à être vendus.

La conception de l'industrie repose donc sur trois critères principaux¹ :

- les matières premières utilisées ;
- les techniques de production ;
- le marché et la distribution des produits.

1.2. Évolution des révolutions industrielles

Pour Klaus Schwab², la première révolution industrielle a libéré l'homme de la force animale en apportant la machine à vapeur, qui inaugure la production mécanisée et les chemins de fer. La deuxième lui a apporté la production de masse, grâce à l'électricité et aux chaînes de montage. La troisième émerge avec la naissance de l'informatique, et la quatrième fusionne le numérique, le physique et le biologique.

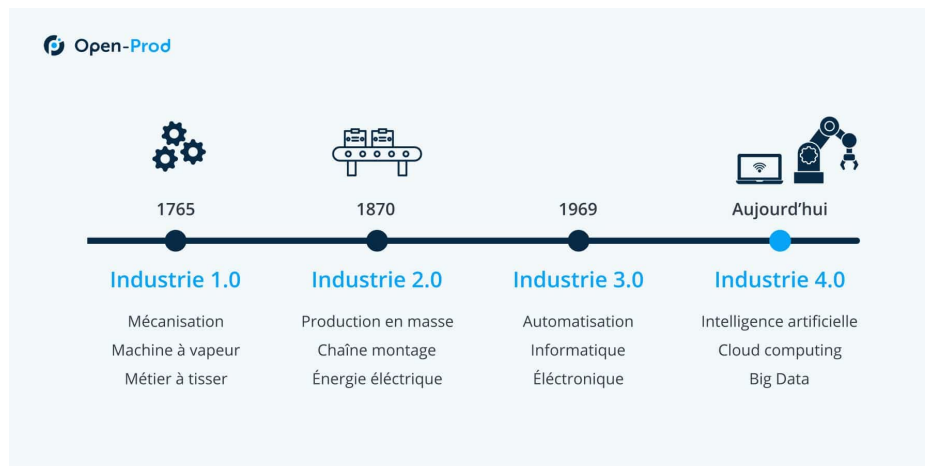
La figure numéro treize³ montre uniquement les quatre premières révolutions industrielles : de la première, l'industrie 1.0, marquée par la mécanisation, à la deuxième, l'industrie 2.0, liée à l'électrification et à la production de masse ; puis l'industrie 3.0, caractérisée par l'automatisation et l'informatisation ; et enfin l'industrie 4.0, principalement fondée sur la robotisation et l'intelligence artificielle.

¹ Flacher, op. cit.

² Even, A. (2018). *Fiche de lecture : La quatrième révolution industrielle de Klaus Schwab*. La commission Économie, Next Humanity. Consulté le 1 mars 2025 sur <https://nxu-thinktank.com/wp-content/uploads/2018/02/Klaus-Schwab.pdf>

³ Open-Prod. (2022). *Qu'est-ce que l'industrie 4.0 ?* Open-Prod. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://open-prod.com/wp-content/uploads/2022/09/visuel-evolution-industrie.jpg>

Figure 13 : De l'Industrie 1.0 à l'Industrie 4.0



Source : (Ibid.)

1.2.1. Industrie 1.0 : La Mécanisation

La première révolution industrielle, également appelée industrie 1.0, était entre les années 1760 et 1840. Dans cette période, l'industrie a transformé la production traditionnelle manuelle vers la production en utilisant des machines à vapeur. Ces machines, créées par James Watt en 1769, ont été l'invention qui a marqué cette époque. Bien que leur nom le montre, ces machines utilisaient la vapeur d'eau, habituellement produite par le chauffage au charbon comme moyen de fournir l'énergie. Cette évolution a permis le développement de plusieurs domaines, y compris celui du fer, de l'agriculture et de l'exploitation minière¹.

D'autres inventions majeures de la première révolution industrielle sont : la mécanisation du métier à tisser en 1786 ; la machine à égrener le coton en 1793, une égreneuse qui sépare le coton de sa fibre et qui a considérablement simplifié une tâche nécessitant beaucoup de main-d'œuvre ; et l'invention de la Fusée de Stephenson en 1829, qui a permis de transporter à grande vitesse des passagers et des marchandises sur des chemins de fer sillonnant bientôt le monde entier².

¹ Zhang, Y. (2020, 14 février). *Industries 1.0 – 3.0*. Hapticmedia. Consulté le 3 mars 2025 sur <https://hapticmedia.com/blog/fr/industrie-4.0/>

² L'Étudiant. (2023, 24 août). *La révolution industrielle : définition, contexte et inventions majeures*. La cellule contenu de l'Étudiant. Consulté le 5 mars 2025 sur <https://tinyurl.com/mr3wvs6s>

1.2.2. Industrie 2.0 : L'Électrification

La deuxième révolution industrielle, appelée aussi l'industrie 2.0, s'est déroulée entre 1870 et 1914. Durant cette phase, les usines ne dépendaient plus des machines à vapeur mais de l'électrification, ce qui a favorisé l'amélioration de l'efficacité des lignes de production massive et la réduction des coûts. Il y avait aussi, durant cette période, l'expansion des réseaux ferroviaires, ce qui a renforcé l'interconnexion entre les différentes régions, facilitant ainsi les interactions, notamment grâce à l'introduction du télégraphe¹.

1.2.3. Industrie 3.0 : L'Automatisation et La Mondialisation

La nouveauté dans la troisième révolution industrielle était l'introduction de la numérisation et de l'automatisation, ce qui a entraîné le développement des processus de fabrication. L'ordinateur était le moteur principal de cette période, car il était essentiel pour traiter et stocker d'énormes quantités de données. De même, l'apparition d'Internet a marqué un grand tournant dans le monde de la communication, puisque le courrier électronique a contribué à transformer et à faciliter les communications des entreprises, ce qui a conduit à la mondialisation, facilitant ainsi la mise en relation entre les entreprises, leurs services et leurs besoins. Cela a simplifié la gestion de la chaîne d'approvisionnement, amélioré le flux de production et réduit les coûts logistiques².

1.2.4. Industrie 4.0 : La Numérisation

À l'inverse des révolutions industrielles antérieures, l'Industrie 4.0 ne se présente pas comme une révolution technologique inédite, mais comme une métamorphose ingénieuse et harmonieuse des technologies existantes, rendue possible par l'interconnexion fluide des systèmes. Elle favorise la conversation spontanée entre les machines, les programmes et les processus de fabrication, en exploitant des outils comme l'*IoT*, l'intelligence artificielle, le *cloud computing* et les systèmes cybernétiques.

¹ Zhang, op. cit.

² Ibid.

Elle met l'accent sur l'interconnexion en temps réel entre les différents éléments de la chaîne de production¹ :

- les flux de production (matières premières, processus industriels) ;
- les machines et équipements, qui peuvent s'adapter automatiquement aux besoins de production ;
- les produits, qui peuvent contenir des informations sur leur propre fabrication (via des puces RFID) ;
- les travailleurs humains, qui interagissent avec ces technologies pour superviser et optimiser les processus.

1.2.5. Industrie 5.0 : L'Interaction homme-machine

L'Industrie 5.0 a été initialement envisagée comme une évolution naturelle de l'Industrie 4.0, plutôt que comme une révolution technologique radicale. D'après la Commission Européenne, l'initiative en question n'était pas considérée au début comme une révolution industrielle à part entière, mais plutôt comme un complément aux actions déjà entreprises, en incorporant de manière progressive des aspects humains et environnementaux aux technologies préexistantes. Certains chercheurs la perçoivent même comme une simple extension de l'Industrie 4.0 (une industrie 4.1), illustrant une progression plutôt qu'une perturbation révolutionnaire².

Cette industrie est basée sur trois principes clés³ :

- Importance de l'individu : l'industrie 5.0 met l'accent sur la priorité donnée à l'individu plutôt que sur son remplacement, de sorte que la technologie est utilisée au service de l'individu et pour faciliter son travail. Le principal objectif de la technologie est donc de faciliter la qualité de vie de l'individu, d'améliorer son travail et sa sécurité pendant l'exécution de ses tâches, et non d'annuler son existence. Ce principe est principalement lié au remplacement du cerveau humain par l'intelligence artificielle et les robots autonomes.

¹ Cross Data. (s. d.). *Comment l'intelligence artificielle transforme les processus de production dans l'industrie ?* Cross Data. Consulté le 5 mars 2025 sur <https://www.crossdata.tech/comment-lintelligence-artificielle-transforme-les-processus-de-production-dans-lindustrie/>

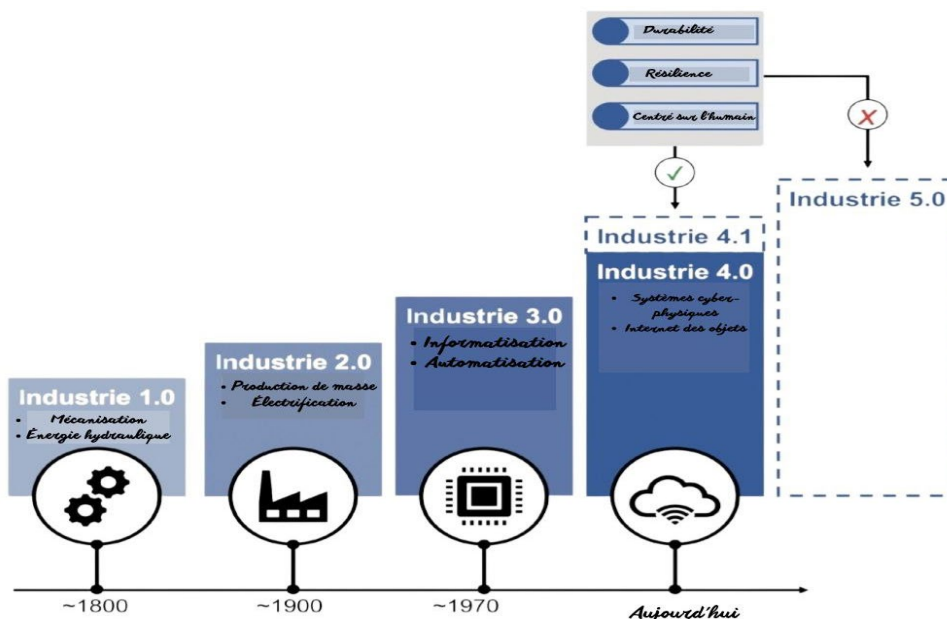
² Bending, D., Lau, K., Schulte, J., & Endrib, S. (2021). *Industrie 5.0*. *Industrie 4.0 Management*, 37(6), 20–22.

³ Ibid.

- Durabilité : ce principe se pose sur le cas de la protection environnementale, où il faut maximiser la consommation des ressources afin de réduire les déchets.
- Flexibilité : face aux crises comme la pandémie du COVID-19, ce principe cherche à renforcer la flexibilité des chaînes d’approvisionnement et des systèmes de production en intégrant des technologies capables de prévoir les anomalies et les relier avec des systèmes d'analyse causale, qui peuvent détecter les causes.

La figure numéro quatorze (traduit de Bending, op. cit., p. 20-22), initialement en langue allemande et traduite ici, permet de mieux comprendre la vision préliminaire de la Commission européenne sur l'industrie 5.0. Elle illustre les différentes révolutions industrielles : l'industrie 1.0 fondée sur la mécanisation et l'énergie hydraulique, l'industrie 2.0 sur la production en masse et l'électrification, l'industrie 3.0 sur l’informatisation et l'automatisation, l'industrie 4.0 sur les systèmes cyber-physiques et l’IoT, et enfin, l'industrie 5.0, visionnée comme une industrie 4.1, reposant sur trois principes clés : recentrage sur l'humain, durabilité et résilience.

Figure 14 : De l'Industrie 1.0 à l'Industrie 5.0



Source : Traduit de (Bending, op. cit., p. 20-22)

L'interaction homme-machine dans l'industrie 5.0 implique plusieurs niveaux d'association entre les êtres humains et les robots. Quand on parle des robots dans l'industrie, on visualise un haut niveau d'eux qui s'appelle les cobots. Ce sont des robots industriels qui ont pour objectif

la réalisation des applications sans cage, donc ils peuvent se déplacer, ils peuvent aussi apprendre plusieurs tâches.

Concernant les niveaux d'interaction, il y en a plusieurs, mais ils se résument en trois sous-types principaux¹ :

- La coexistence : c'est le cas où chacun, homme et cobot, a sa propre tâche indépendante l'un de l'autre. Pour mieux comprendre, on donne l'exemple d'une zone de production : les cobots sont en train d'assembler un produit et l'humain est de l'autre côté, par exemple en train de contrôler la qualité ou de vérifier le résultat final de l'assemblage. Donc, leurs tâches sont séparées.

- La coopération : dans ce cas, les cobots et les humains ont aussi des tâches indépendantes, mais la différence est que leur tâche complète celle de l'autre. À titre d'exemple, dans un entrepôt, les cobots placent les boîtes dans un espace de travail humain, et l'humain les emballe. Donc, dans le cycle de production du même produit, les cobots et l'être humain participent de manière complémentaire.

- La collaboration : c'est le niveau ultime. Ici, l'être humain et les robots industriels travaillent en même temps sur les mêmes tâches, visionnant la meilleure interconnexion entre homme et machine. Par exemple, dans une zone de production, le cobot tient une pièce et l'humain la fixe. Il y a ici une interaction directe : l'homme peut contrôler les robots par des ordres vocaux, ou bien le robot lui-même peut détecter s'il y a un mouvement étrange ou si l'homme s'arrête.

1.3. Introduction à l'industrie 4.0

L'industrie 4.0, d'une vue générale, est la révolution industrielle la plus importante, car elle a intégré et associé les différentes technologies développées au fur du temps, afin de pousser les entreprises industrielles vers l'utilisation des processus digitalisés et à devenir des entreprises intelligentes.

¹ Sanogo, K. (2024). *Optimisation de l'ordonnancement des tâches de transport des robots intelligents et collaboratifs dans le contexte de l'industrie 5.0* [Thèse de doctorat, École doctorale Sciences et Métiers de l'Ingénieur].

1.3.1. Définition et concept général

Comme on l'a mentionné précédemment, l'industrie 4.0¹ englobe toutes les technologies avancées comme l'intelligence artificielle, l'*IoT*, la simulation, l'impression 3D et la cybersécurité, tout cela dans le cadre de mieux collecter de grandes quantités de données et les analyser.

Cette collecte de données se fait en utilisant des capteurs indépendants qui peuvent communiquer entre eux, réalisant l'interconnexion sans fil. Chaque capteur est lié à une machine particulière. Les données recueillies peuvent être visualisées à l'aide de modèles de vision, d'ordinateurs, de tablettes, etc., ce qui améliore la transparence de la productivité des machines en temps réel et rend les processus de production plus efficaces et pertinents².

Elle incorpore aussi un aspect numérique sophistiqué, caractérisé par l'apparition des Systèmes Cyber-Physiques (CPS). Ces dispositifs, vus comme des éléments clés de cette révolution industrielle, s'appuient sur l'Internet des objets (IoT), le *Cloud computing*, l'Intelligence artificielle et le *Big Data* afin de collecter, transmettre et gérer les données en temps réel. Cependant, plus que la simple numérisation des processus de production, l'Industrie 4.0 pose d'importants défis, en particulier en ce qui a trait à l'interaction entre ces systèmes intelligents et les employés. L'objectif de l'intégration des Systèmes Cyber-Physiques et Humains (CPHS) est donc de promouvoir une coopération efficace entre l'homme et la machine, dans le but d'améliorer la flexibilité et l'adaptabilité des processus industriels³.

1.3.2. Contexte et origine de l'Industrie 4.0

Par le passé, les grandes entreprises qui faisaient plusieurs centaines de millions de revenus préféraient produire en grande quantité. Ce modèle leur permettait de fabriquer beaucoup de

¹ Shrir, S., Jaegler, A., & Montoya-Torres, J. R. (2023). *Uncovering Industry 4.0 technology attributes in sustainable supply chain 4.0: A systematic literature review*. *Business Strategy and the Environment*, 32(7), 4143–4166.

² Ibid.

³ Mecheri, C. (2021). *Éthique et Industrie 4.0 : définition et témoignage industriel*. LISTIC ; LAMIH. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03413885>

produits et de les vendre sans limites. L'introduction de la chaîne de montage en 1913, grâce à Ford, a été importante car elle a rendu la production de masse plus efficace et a aidé son succès¹.

La production en série a été courante dans les industries 2.0 et 3.0. Elle a apporté des gains d'efficacité, mais a aussi montré certaines limites. Ce modèle limite la personnalisation des articles. Henry Ford a bien montré cette limitation en disant que les acheteurs de la Ford T pouvaient choisir n'importe quelle couleur, mais seulement si c'était du noir. De plus, produire en grande quantité peut entraîner trop de stock, ce qui cause des pertes d'argent si les articles personnalisés ne sont pas vendus. Ce modèle pourrait freiner l'utilisation de nouvelles technologies qui pourraient améliorer la production².

L'industrie 4.0 est née en Allemagne pour résoudre le problème des coûts élevés de la production personnalisée. Ainsi, la transition de la production en masse à la production personnalisée a nécessité l'utilisation des systèmes connectés dans les usines. Cette révolution se base sur deux points essentiels : les *smart factories* (usines intelligentes) et l'interconnexion intelligente des équipements³.

De ce fait, les *smart factories* font partie de l'industrie 4.0. Dans ces usines intelligentes, la plupart des processus de production s'exécutent d'une manière autonome, grâce à des robots, comme les robots collaboratifs (cobots) qui peuvent faire des tâches compliquées, apprendre et s'adapter mieux à l'environnement de travail, en exploitant des bases de données collectées, qu'elles soient issues du service contrôle qualité (anomalies précédentes) ou bien de prévisions générées à l'aide de l'IA. De plus, la plupart des machines autonomes sont équipées d'interfaces homme-machine (HMI) qui facilitent leur contrôle, tout en offrant la possibilité de visualiser leur productivité⁴.

¹ Zhang, op. cit.

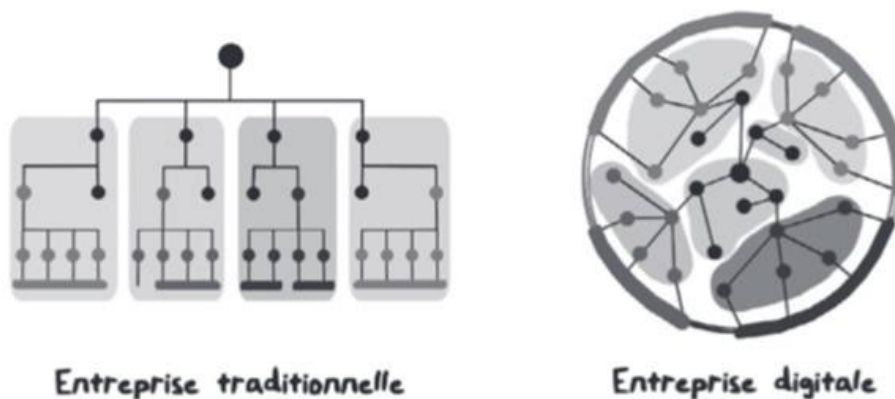
² Ibid.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

La figure numéro quinze met en évidence les disparités entre une entreprise traditionnelle et une entreprise numérique en matière d'organisation et de flux d'informations¹. Dans le premier cas se dessine une structure hiérarchique avec des blocs distinctifs formant une pyramide où la communication est principalement verticale du sommet vers la base. À l'inverse, l'entreprise digitale se caractérise par un schéma circulaire, connecté et flexible, qui permet à l'information de circuler dans toutes les directions de manière plus rapide et fluide.

Figure 15 : Différence entre la circulation de l'information dans une entreprise traditionnelle et celle d'une entreprise intelligente



Source : (Babinet, op. cit., p. 22)

1.4. Les principes fondamentaux de l'Industrie 4.0

Ces principes incluent quatre points essentiels, qui ne sont pas seulement considérés comme des piliers fondamentaux, mais aussi comme une incitation à pousser les entreprises industrielles à digitaliser leurs processus.

1.4.1. Interopérabilité

L'interopérabilité, dans un sens général, est définie comme la possibilité de créer un réseau qui favorise la communication entre les différents matériaux, équipements et systèmes internes d'une entreprise, appliquant ainsi le fonctionnement de l'Internet des objets (IoT). Cette

¹ Babinet, G. (2020, 18 novembre). *Refondre les politiques publiques avec le numérique*. Administration territoriale, État, citoyens (Collection Les beaux livres du savoir). Dunod.

interconnexion intelligente améliore la capacité opérationnelle et fait gagner du temps pour l'entreprise¹.

Ce principe passe par deux phases claires² :

- La première implique l'installation de capteurs intelligents, qui peuvent collecter les données et communiquer entre eux dans un espace de transfert de données, par exemple, la visualisation des données collectées en temps réel sur PC, tablette ou même une application mobile. Ceci améliore la rapidité de la collecte de données et la visibilité sur les processus industriels.

- La deuxième phase consiste à insérer les données collectées dans les systèmes industriels comme le système d'apprentissage (LMS), pour renforcer les compétences du personnel, le système d'exécution de la fabrication (MES), assurant le suivi de la production et garantissant la qualité, et aussi le logiciel bien connu de planification des ressources d'entreprise (ERP), dans le but d'améliorer la coordination et la prise de décision en temps réel.

1.4.2. *Transparence de l'information*

Dans le cadre de l'évolution l'industrie 4.0, la clarté des informations renvoie à la facilité d'accès et de compréhension des données ainsi que des mesures mises en place dans ce domaine spécifique de conception industrielle novatrice et dynamique. Grâce à l'utilisation avancée de technologies telles que le Big Data analytique et prédictif ou encore la RFID et l'Internet des objets (IoT), il devient dorénavant possible de collecter en masse puis traiter avec précision les données provenant des différents processus industriels en place³.

1.4.3. *Assistance technique*

L'assistance technique signifie que les systèmes cyber-physiques aident les gens en rendant les informations faciles à voir et à comprendre, ce qui permet de prendre des décisions rapidement

¹ Spencer, S. (2021, 24 août). *Les 4 principes de conception de l'industrie 4.0*. VKS. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://vksapp.com/fr/blogue/4-design-principes-de-l-industrie-4>

² Ibid.

³ Shaping a World of Trust. (s. d.). *Quand la transparence devient une expertise*. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://group.bureauveritas.com/fr/magazine/quand-la-transparence-devient-uneexpertise>

et efficacement. Les logiciels d'instruction de travail sont un bon exemple. Ils fournissent des guides interactifs pour aider les opérateurs dans leur travail¹.

De plus, ces systèmes peuvent aussi faire des tâches physiques qui sont difficiles, épuisantes ou dangereuses pour les travailleurs. Les robots en usine montrent bien cela en aidant à diminuer les risques de blessures. L'assistance technique aide les industries à mieux utiliser leurs données en confiant les tâches difficiles aux machines, ce qui augmente la sécurité et la productivité dans l'atelier².

1.4.4. Décentralisation des décisions

L'utilisation de l'intelligence artificielle permet de répartir les décisions en production, sans avoir besoin d'un seul contrôle. Chaque unité fonctionne de manière indépendante grâce à des systèmes qui peuvent décider sans aide des opérateurs. Au lieu de dépendre d'une surveillance humaine tout le temps, ces systèmes se servent de l'Internet des objets (IoT) et du cloud pour gérer automatiquement les différences de production et les besoins en matériaux³.

Cela aide à automatiser les réglages, les calibrages et les alertes, ce qui diminue le besoin d'intervention humaine. On fait appel à un supérieur seulement s'il y a des problèmes, des conflits ou des objectifs qui s'opposent. Enfin, en plus de son indépendance, un système décentralisé se remarque par sa flexibilité et sa capacité à grandir, ce qui permet de mieux répondre aux changements dans l'industrie⁴.

¹ Spencer, S. (2021, 26 juillet). *Process vs. Resource: Which Implementation is Best for You?* VKS. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://vksapp.com/blog/process-vs-resource>

² Ibid.

³ Systemes. (2021, 26 juillet). *Qu'est-ce que l'Industrie 4.0 ?* Consulté le 6 mars 2025 sur <https://www.ip-systemes.com/details-qu+est+ce+que+l+industrie+4+0-798.html>

⁴ Ibid.

1.5. Les piliers technologiques de l'Industrie 4.0

On va aborder les points essentiels de chaque pilier de l'industrie 4.0 en les découpant en dix groupes technologiques, tout en redécoupant et en enrichissant la proposition en provenance du Boston Consulting Group¹. Ces groupes technologiques incluent² :

L'Intelligence Artificielle (IA) et le Machine Learning, l'Infonuagique (*Cloud Computing*), les Systèmes Cyber-Physiques (CPS), les données massives (Big Data) et leur analyse, l'Internet des Objets (IoT), les robots/machines autonomes, la communication *inter machines* (Machine-to-Machine, M2M), la cybersécurité, les systèmes de simulation et la réalité augmentée.

1.5.1. L'Intelligence Artificielle (IA) et le Machine Learning (ML)

L'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique (ML) représentent des notions profondément connectées, fréquemment citées dans le cadre du big data, de la prévision analytique et d'autres secteurs de la digitalisation. Toutefois, malgré leur popularité croissante, ces technologies se différencient sur divers points.

1.5.1.1. L'Intelligence Artificielle (IA)

L'intelligence artificielle est définie par Minsky³ comme « *la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains, car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique* ».

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'intelligence artificielle englobe un large éventail de technologies pour concevoir des machines et des ordinateurs capables d'imiter le travail et le

¹ Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2019). *Industrie 4.0 et Lean : Hiérarchie, amélioration ou complémentarité ?* Communication présentée à CIGI QUALITA.

² Danjou, C., Pellerin, R., & Rivest, L. (2017). *Le passage au numérique : Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO).

³ Chraïbi Kaadoud, I. (2018, 25 septembre). *Les challenges de l'IA aujourd'hui*. Onepoint. Consulté le 8 mars 2025 sur <https://www.groupeonepoint.com/fr/publications/challenges-ia-aujourd'hui/>

raisonnement humain, telles que la capacité de visualiser, de comprendre le langage parlé ou écrit et d'y répondre, d'analyser les données et de proposer des recommandations.

1.5.1.2. Le Machine Learning (ML)

L'apprentissage automatique, également désigné sous les termes de *machine learning*, d'apprentissage artificiel ou d'apprentissage statistique, constitue un domaine de l'intelligence artificielle fondé sur des méthodes mathématiques et statistiques. Son objectif consiste à permettre aux ordinateurs d'acquérir des connaissances à partir de données, c'est-à-dire d'optimiser leurs performances dans l'exécution de diverses tâches sans requérir une programmation explicite pour chacune d'entre elles¹.

De manière plus générale, ce domaine inclut la conception, l'analyse, l'optimisation, le développement ainsi que l'implémentation de ces méthodes. L'expression "apprentissage statistique" est employée dans la mesure où l'objectif consiste à élaborer des modèles visant à minimiser l'erreur statistique moyenne, afin d'obtenir des prédictions d'une précision accrue².

1.5.2. L'Infonuagique (Cloud Computing)

Le *cloud computing*³, également appelé infonuagique, est un modèle technologique qui permet un accès généralisé à des ressources informatiques communes, comme les réseaux, les serveurs, le stockage de données, les applications et divers services. En déléguant la gestion des infrastructures informatiques à un tiers, il participe à la diminution des dépenses et à l'amélioration de l'utilisation des ressources.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, le *cloud computing*⁴ est essentiel pour le partage et la circulation de données entre divers lieux et systèmes. Il autorise aussi l'hébergement et la gestion des données, ainsi que l'activation de fonctions indispensables pour la production, le suivi et la supervision des processus industriels. Ce modèle est basé sur la virtualisation des

¹ Google Cloud. (s. d.). *Intelligence artificielle (IA) ou machine learning (ML)*. Google. Consulté le 7 mars 2025 sur <https://cloud.google.com/learn/artificial-intelligence-vs-machine-learning?hl=fr>

² Ibid.

³ Danjou, op. cit.

⁴ Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing* (NIST Special Publication No. 800-145). National Institute of Standards and Technology.

infrastructures et englobe divers services indispensables tels que l'Infrastructure as a Service (IaaS), le Platform as a Service (PaaS), le Software as a Service (SaaS) ainsi que les centres de données (data centers).

1.5.3. Les Systèmes Cyber-Physiques (Cyber-Physical Systems, CPS)

Les systèmes cyber-physiques (CPS)¹ sont des machines qui peuvent communiquer entre elles, agir toutes seules et se contrôler. Ils agissent comme des points liés dans l'Internet des objets (IoT).

Dans l'Industrie 4.0, les systèmes cyber-physiques (CPS)² utilisent des capteurs, des logiciels, des technologies de communication et des actionneurs pour surveiller et interagir avec le monde réel en temps réel. Avec ces compétences, les entreprises de fabrication peuvent devenir plus intelligentes, plus réactives et plus innovantes pour s'ajuster aux changements du marché.

1.5.4. Les données massives (Big Data) et leur analyse

Les énormes volumes d'informations connus aussi sous le nom de mégadonnées et leur analyse contribuent à la gestion efficace d'un large éventail d'informations issues de sources variées et de formats diversifiés. Cela facilite la découverte d'informations pertinentes et l'amélioration du processus décisionnel. À titre illustratif : il est envisageable d'utiliser en temps réel les données provenant des GPS des smartphones ainsi que des caméras embarquées pour anticiper les embouteillages et recommander les itinéraires optimaux en s'établissant sur les feux tricolores ainsi que sur les prévisions météorologiques et les interactions sur les réseaux sociaux³.

¹ Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0* (Final report of the Industrie 4.0 Working Group No. 0).

² Wu, X. (2022). *Transformation des systèmes de production existants et de leurs systèmes d'information d'entreprise (EIS) en systèmes de production cyber-physiques (CPPS) dans le contexte de l'industrie 4.0* [Thèse de doctorat, HESAM Université].

³ Danjou, op. cit.

Dans l'Industrie 4.0, ces données¹ peuvent venir de la production, des produits ou des avis des clients. Ils utilisent plusieurs outils avancés, comme le calcul haute performance (HPC), des groupes de calculs (HPCC) et la plateforme HADOOP-YARN.

1.5.5. L'Internet des objets (IoT)

Le réseau de l'Internet des objets (IoT)² connecte divers objets physiques, systèmes informatiques, sources d'information et services intelligents. Ceci permet aux objets de partager des informations et de communiquer avec leur milieu, qu'il soit réel ou virtuel.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'IoT³ est crucial en reliant différentes machines et systèmes, ce qui permet aux équipements de décider de façon autonome et de s'ajuster en fonction des exigences de production. Son fonctionnement repose sur diverses technologies, y compris les intergiciels (middleware), les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et les puces RFID.

1.5.6. Les Machines Autonomes (Robots)

Les machines ont joué un rôle essentiel dans la production industrielle pendant des décennies, réalisant des tâches complexes de manière programmée. Toutefois, avec l'émergence de l'Industrie 4.0, leur fonctionnement a connu une évolution majeure. Des technologies récentes telles que l'IoT et l'intelligence artificielle ont conféré une plus grande intelligence et autonomie aux machines, leur permettant de répondre à des besoins en temps réel, de communiquer entre elles et d'améliorer les processus de production. Cette progression améliore la flexibilité et l'efficacité de la chaîne de production, et certaines machines sont conçues pour interagir directement avec les opérateurs humains, garantissant ainsi la sécurité à travers les principes de la cobotique. Par conséquent, l'Industrie 4.0 révolutionne les usines en rendant les machines plus intelligentes, réactives et intégrées aux processus humains⁴.

¹ Ibid.

² Saleh, I. (2018). Internet des Objets (IdO) : *Concepts, enjeux, défis et perspectives*. Revue Internet des Objets, 2.

³ Danjou, op. cit.

⁴ Ibid.

1.5.7. La communication *inter machines* (Machine-to-Machine, M2M)

L'avènement des systèmes et des machines autonomes a entraîné une croissance significative des technologies de communication entre machines (M2M). À la différence de l'Internet des Objets (IoT) qui s'appuie sur un réseau mondial, la communication Machine-to-Machine met en place des réseaux locaux pour faciliter les échanges de données entre des dispositifs autonomes. Cette technologie repose sur une variété de protocoles et de normes, notamment TCP/IP, IGRS, UPnP, DLNA et OPC-UA¹, ce qui favorise l'interconnexion et l'interopérabilité des machines².

1.5.8. La cybersécurité

La révolution industrielle 4.0 permet la connexion des machines et des systèmes de production grâce à l'Internet des objets (IoT) et à des technologies de communication avancées ; cela facilite une gestion industrielle plus efficace, mais expose également les systèmes à divers risques en matière de cybersécurité comme les intrusions malveillantes et les fuites d'informations sensibles. Les transmissions d'informations entre les machines et le processus de contrôle à distance exposent les infrastructures industrielles aux risques des cyberattaques, susceptibles de perturber la production ou de révéler des informations confidentielles stratégiques³.

Les réseaux privés virtuels (VPN), le partage pair à pair (P2P), la protection contre l'usurpation d'adresse IP (PIR), les certificats SSL/TLS et le système de sécurisation des extensions DNS (DNSSEC)⁴ sont utilisés pour authentifier les utilisateurs dans le domaine de la gestion des

¹ (Matooma Wireless Logic Group, s. d.) TCP/IP : communication sur Internet et réseaux locaux ; IGRS : partage de ressources entre appareils intelligents (surtout en Chine) ; UPnP : connexion automatique des appareils sans configuration ; DLNA : partage de contenu multimédia entre appareils ; OPC-UA : communication entre machines et systèmes industriels.

² Ibid.

³ Weber, R. H., & Weber, R. (2010). *Internet of things: Legal perspectives*. Springer.

⁴ VPN : connexion sécurisée et chiffrée entre un appareil et un réseau distant ; P2P : échange direct de données entre utilisateurs sans serveur central ; PIR : détection de mouvement basée sur les infrarouges ; TLS : protocole de sécurisation des communications sur Internet ; DNSSEC : protection des requêtes DNS contre les attaques et falsifications.

stocks et de la chaîne logistique. Ils permettent également de surveiller les mouvements d'objets. Grâce à ces technologies avancées la sécurité des processus industriels est assurée pour un fonctionnement fluide et fiable des équipements sans compromettre leur intégrité ni leur confidentialité¹.

1.5.9. La simulation

La simulation est largement utilisée dans divers domaines de l'ingénierie de nos jours ; cependant, avec l'émergence de l'Industrie 4.0, cette notion prend une nouvelle ampleur en permettant la reconstitution numérique de chaque phase du processus de production².

Un élément essentiel de cette méthode repose sur le concept de jumeaux numériques ; des versions virtuelles des équipements physiques comprenant des machines et des capteurs ainsi que les données correspondantes (telles que la vitesse ou la force), les composants et même les interactions humaines intégrées dans ces modèles numériques pour analyser et améliorer en temps réel les procédés industriels³.

1.5.10. La réalité augmentée

La réalité augmentée (RA) est une technologie qui permet de superposer en temps réel des données numériques à l'environnement physique. Elle est déjà employée dans le secteur commercial, notamment pour la visualisation d'un meuble virtuel dans un salon avant son acquisition. Elle peut également apporter son assistance aux opérateurs logistiques en orientant les conducteurs de chariots élévateurs au sein d'un entrepôt, en leur fournissant en temps réel la localisation précise d'une palette à récupérer. Les applications de réalité augmentée permettent d'améliorer l'efficacité des opérateurs, de diminuer les risques d'erreurs, d'accélérer les procédures et d'accroître la productivité au sein des contextes industriels⁴.

¹ L., N. (2023, 23 février). *L'industrie 4.0 : le grand défi français*. *Compareur Banque*. Consulté le 10 mars 2025 sur <https://www.compareurbanque.com/comparatif-banque/lindustrie-40-le-grand-defi-francais/>

² Danjou, op. cit.

³ Visiativ. (2022, 19 décembre). *Simulation numérique : définition et enjeux*. Visiativ. Consulté le 10 mars 2025 sur <https://www.visiativ.com/actualites/actualites/simulation-numerique-definition-et-enjeux/>

⁴ Danjou, op. cit.

Section 2 : L'Internet des Objets comme levier d'optimisation des processus de production

Dans cette section, nous allons présenter l'Internet des objets. Nous définirons plusieurs termes liés à ce contexte, comme les objets connectés et le Machine-to-Machine. Ensuite, nous parlerons de l'évolution de l'Internet des objets et de ses formes d'application. Et enfin, nous aborderons l'intégration du système IoT et de ses technologies.

2.1. Introduction à l'Internet des Objets

L'Internet des objets (IdO) est un réseau mondial d'objets établi sur le concept d'interconnexion intelligente entre différents types d'objets (équipements). À titre d'exemple, tous les ordinateurs, les capteurs, les puces RFID et les téléphones portables pourront envoyer des informations et éventuellement recevoir des instructions. L'IdO permet d'imaginer de nombreux cas d'usage établis sur la connexion entre le monde réel et le monde numérique. Cependant, il rencontre plusieurs difficultés qui doivent être examinées pour permettre à l'Internet des objets d'atteindre tout son potentiel¹.

2.1.1. Définition générale de l'IoT

Le terme Internet des Objets (IdO) (en anglais Internet Of Things, IoT) n'a pas encore de définition commune, ce qui s'explique par le fait que ce concept, encore récent, est en pleine évolution. Il existe donc autant de définitions que d'organisations engagées dans la réflexion, le développement ou la mise en place de normes pour ce nouveau modèle.

Selon l'Union internationale des télécommunications², l'Internet des objets est défini comme « *une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution* ». Donc l'Ido

¹ Larras, M., & Khalfouni, D. (2019). *Défis de sécurité de l'Internet des Objets : Problèmes et solutions* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou].

² UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS. (2018). *Cadre de sécurité applicable à l'Internet des objets fondé sur le modèle passerelle*. UIT. Consulté le 10 mai 2025 sur https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-X.1361-201809-I!!PDF-F&type=items

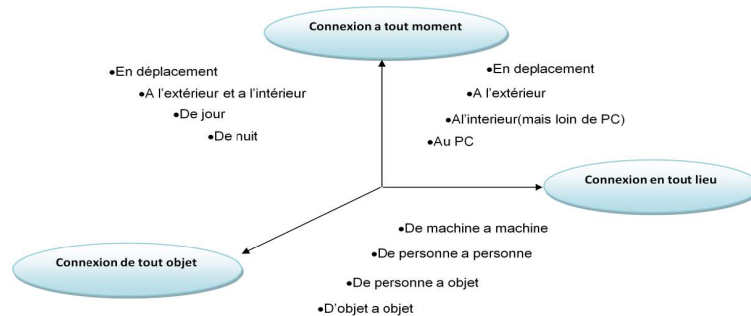
est considéré comme un outil qui a un impact majeur sur la technologie et la société, montrant ainsi des capacités d'identification, de collecte de données, de traitement et de communication, tout en garantissant le respect des exigences de sécurité et de confidentialité.

Pour Baland et al.¹, l'IoT est « un réseau d'éléments chacun muni de capteurs qui sont connectés à Internet ».

Le cluster des projets européens de recherche sur l'Internet des objets² définit aussi l'Internet des objets comme « une infrastructure dynamique d'un réseau global. Ce réseau global a des capacités d'auto-configuration établies sur des standards et des protocoles de communication interopérables. Dans ce réseau, les objets physiques et virtuels ont ces éléments qui comprennent des identités, des attributs physiques, des personnalités virtuelles et des interfaces intelligentes, qui sont intégrés au réseau d'une façon transparente ».

Cette vision de l'Internet des objets introduira une nouvelle dimension aux technologies de l'information et de la communication, en plus des deux dimensions temporelle et spatiale qui permettent aux personnes de se connecter de n'importe où et à n'importe quel moment, nous aurons une nouvelle dimension « objet » qui leur permettra de se connecter à n'importe quel objet (figure numéro seize).

Figure 16 : Nouvelle dimension de l'IdO



Source : Adapté de (Challal, 2012)

¹ Baland, C., Cauquil, D., Gayet, T., Juvigny, J., Lifchitz, R., & Nguyen, N.-K. (2016). *La sécurité de l'Internet des objets* [Livre blanc]. Econocom.

² Cluster of European Research Projects on the Internet of Things. (2010, mai). *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*. CERP-IoT Cluster, European Commission.

2.1.2. Définition d'un objet connecté

Dans le domaine de l'IoT (Internet des objets), un dispositif connecté fait référence à tout objet capable d'échanger des informations avec d'autres entités physiques ou numériques¹.

2.1.2.1. Principales caractéristiques des objets connectés

Un objet connecté peut agir tout seul dans le monde réel sans avoir besoin d'une aide humaine directe pour ses actions physiques. Il doit respecter différentes contraintes comme la mémoire disponible, la vitesse des échanges de données et les besoins en énergie. Il doit être adapté à des cas d'utilisation spécifiques en raison de son niveau d'intelligence intégré et de sa capacité à échanger des informations avec des logiciels via ses capteurs intégrés. En fin de compte, un objet connecté acquiert une réelle valeur lorsqu'il est connecté à d'autres objets et composants logiciels interdépendants. Par exemple, une montre intelligente est utile essentiellement dans un environnement centré sur la santé et le bien-être plutôt que simplement pour lire l'heure².

Un objet connecté inclut trois éléments essentiels³ :

- les informations créées ou reçues et ensuite enregistrées ou envoyées ;
- les méthodes utilisées pour analyser ces informations ;
- l'environnement où il se déploiera et interagira.

2.1.2.2. Distinctions techniques par rapport aux équipements traditionnels

Dans le tableau numéro neuf, nous allons évoquer les différences entre les différentes fonctionnalités des objets connectés et les équipements de bureau.

¹ Haddab, Y. (s. d.). *Introduction à l'internet des objets (IdO – IoT)* [Cours universitaire en ligne PDF]. Université de Montpellier. Consulté le 10 mai 2025 sur <https://www.lirmm.fr/~seriai/uploads/Enseignement/iot.pdf>

² Ibid.

³ Saleh, I. (2018). *Internet des Objets (IdO) : Concepts, Enjeux, Défis et Perspectives*. Laboratory, Université Paris 8.

Dans ce tableau, nous allons montrer les contraintes et les limites de ces objets (prenons l'exemple d'une *smartwatch*) par rapport aux équipements bureautiques (ordinateurs classiques à titre d'exemple)¹.

Tableau 9 : Tableau comparatif entre les fonctionnalités des OC et les équipements de bureau

Aspect	Objet connecté	Équipement de bureau	Explication
Ergonomie	Petit écran, design compact	Grand écran, design plus libre	Taille limitée : difficile d'entrer un mot de passe ou d'utiliser une interface complexe.
Puissance de calcul	Faible (32 MHz)	Élevée (3 GHz)	Ne peut pas faire plusieurs tâches lourdes en même temps.
Mémoire vive (RAM)	100 KO	2 GO	Très faible capacité de mémoire.
Stockage	256 KO	256 GO	Peu d'espace pour stocker des données ou des programmes.
Connectivité	Bluetooth, NFC (1 Kbits/s)	Réseau filaire ou Wi-Fi (10 Mbits/s)	Connexion lente et de courte portée.
Consommation d'énergie	Très faible (10 μ W)	Élevée (10 W)	Permet de fonctionner longtemps sans recharger.
Sécurité / Chiffrement	Limitée pour économiser la batterie	Avancée	La sécurité forte consomme trop d'énergie pour ces petits appareils.
Mises à jour du système	Longues et parfois bloquantes (>45 min)	Rapides et silencieuses	Mise à jour peut empêcher l'usage de l'objet (ex. voiture connectée immobile).

Source : Adapté de (Larras, op. cit.)

¹ Larras, M., & Khalfouni, D. (2019). *Défis de sécurité de l'Internet des Objets : Problèmes et solutions* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou].

2.1.3. Définition du terme M2M (Machine to Machine)

Le M2M (Machine-to-Machine) représente¹ un ensemble de technologies de réseau, avec ou sans fil, qui permettent à des systèmes de communiquer entre eux et d'échanger automatiquement des données, sans intervention humaine.

Les débuts du M2M ont des racines solides dans l'industrie manufacturière où d'autres technologies telles que le SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) et la surveillance à distance ont permis de diriger et de contrôler les données des équipements à distance. Bien que l'origine exacte du terme ne soit pas confirmée, la première utilisation de la communication entre machines est souvent attribuée à Theodore Paraskevakos. Celui-ci a inventé et breveté une technologie liée à la transmission de données sur les lignes téléphoniques, jouant ainsi un rôle crucial dans le développement de l'identification de l'appelant moderne. Dans la fin des années 1990, Nokia fut parmi les pionniers à employer cette expression et, en 2000, elle coopéra avec Opto 22 pour fournir des services de communication MtoM sans fil à sa clientèle².

2003 a vu la naissance du magazine MtoG (Machine to Good). Cette publication³ a ensuite identifié les six piliers du MtoG, comme la surveillance à distance, la technologie RFID, les réseaux de capteurs, les services intelligents, la télématique et la télémétrie⁴.

2.1.3.1. Principe de fonctionnement du M2M

Le but principal de la technologie machine à machine est d'utiliser les données venant des capteurs et de les envoyer à un réseau donné. Les systèmes M2M utilisent souvent des réseaux

¹ Ibid.

² M2M. (s. d.). *Qu'est-ce que le M2M et à quoi sert le machine to machine ?* M2M network. Consulté le 10 mai 2025 sur <https://www.m2m.fr/guide/m2m/>

³ Ibid.

⁴ La télématique renvoie généralement à la communication et au traitement de données, souvent concernant des véhicules, tandis que la télémétrie inclut la mesure et l'envoi de données à distance à partir de capteurs intelligents.

publics et différents moyens d'accès comme les réseaux mobiles ou Ethernet¹ pour rester peu coûteux².

Les parties principales d'un système M2M comprennent, entre autres, différents capteurs, une puce RFID, une connexion sans fil Wi-Fi ou mobile, ainsi qu'un programme autonome spécialement conçu pour permettre à un appareil du réseau de lire les données et de faire des choix en fonction. Les systèmes M2M lisent les informations pour lancer des actions automatiques prévues à l'avance. Beaucoup de machines échangent des informations en utilisant la télémétrie depuis longtemps pour envoyer des données techniques³.

2.1.3.2. Domaines d'application du M2M

La transmission d'informations entre les machines est souvent utilisée pour surveiller à distance dans divers secteurs industriels tels que l'énergie et les services publics. Cela inclut différentes fonctions telles que la facturation clientèle à travers l'utilisation de compteurs intelligents et le contrôle des paramètres sur le terrain comme la pression atmosphérique et la température, en plus de surveiller l'état des équipements installés⁴.

En cas de consultation médicale à distance (téléconsultation), le M2M peut surveiller en temps réel les données démographiques des patients et même administrer des médicaments éventuellement, suivre les équipements de soins de santé en circulation. Le M2M joue aussi un rôle crucial dans le contrôle à distance et est essentiel dans des domaines tels que la robotique ou l'automobile⁵.

La figure numéro dix-sept illustre un schéma des différents domaines d'application M2M.

¹ L'Ethernet est une méthode de communication en réseau qui utilise des câbles pour connecter différents appareils entre eux.

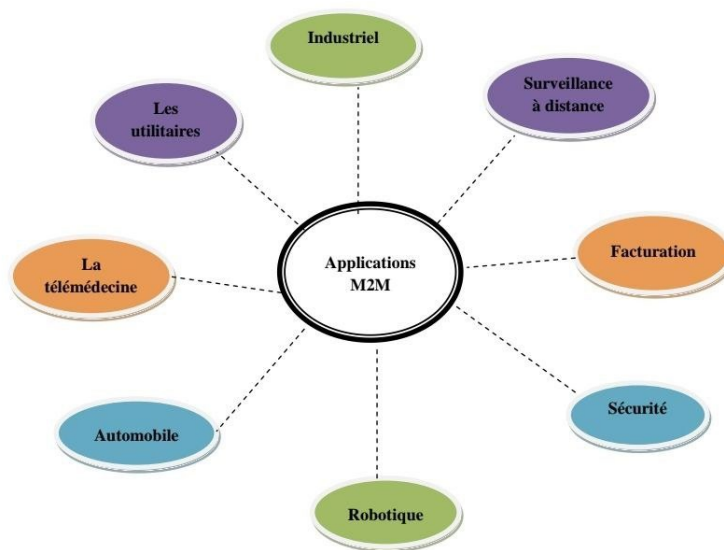
² Larras, op. cit.

³ Ibid.

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

Figure 17 : Domaines d'application du M2M



Source : (Ibid., p. 9)

2.1.3.3. Comparaison entre M2M et IoT

Beaucoup de chercheurs utilisent fréquemment les termes M2M et IoT de manière interchangeable ; cependant, ils diffèrent en réalité l'un de l'autre.

Le M2M est un élément essentiel de l'IoT. Le M2M dépend entièrement de l'IoT pour fonctionner à pleine capacité. L'idée fondamentale des deux termes tourne autour de la communication entre les appareils connectés ; cependant, le M2M se compose généralement d'équipements individuels interconnectés, tandis que l'IoT va au-delà en intégrant divers systèmes au sein d'un vaste réseau interconnecté¹.

2.2. L'IoT dans l'industrie : un catalyseur de transformation

De nos jours, la toile mondiale évolue vers un réseau hyperconnecté où une myriade de liens s'établit entre divers éléments (physiques et numériques), intervenants (biologiques et

¹ Ibid.

algorithmiques), écrits et idées (données liées, métadonnées¹, ontologies², folksonomie³). Ce phénomène est communément appelé “Internet des objets” (IdO/IOT), qui relie non seulement des milliards de personnes, mais également des milliards d'objets au sein d'un écosystème interconnecté.

2.2.1. Évolution et adoption de l'IoT dans l'industrie

Les tout premiers objets connectés ont émergé dans les années 1990 sous la forme de grille-pains, de machines à café et d'autres équipements du quotidien familiers aux foyers domestiques ordinaires. En l'an 2000, LG, un fabricant sud-coréen, fut le pionnier à sérieusement envisager la conception d'appareils électroménagers connectés à l'internet⁴.

Au cours des années 2000 débutèrent les expérimentations préliminaires avec des dispositifs reliés en ligne pour divers usages pratiques avec la consultation automatique de données et d'informations en temps réel⁵.

De nos jours, l'internet des objets (IoT) devient de plus en plus courant. Le nombre de capteurs reliés à l'Internet pourrait potentiellement croître considérablement, allant de plusieurs millions à plusieurs milliards, du fait que tout ce qui existe peut se connecter (animaux, lampadaires, habitations, individus, chaussures et même arbres...)⁶.

¹ Ce sont des informations sur d'autres informations (date et heure d'une photo).

² C'est une façon organisée de représenter des connaissances sur un sujet, comme un dictionnaire intelligent (chien – un animal/ chien – quatre pattes).

³ C'est quand des personnes ajoutent elles-mêmes des mots-clés (tags) pour décrire un contenu (mots-clés libres donnés par les personnes).

⁴ Evans, D. (2011, avril). L'Internet des objets : Comment l'évolution actuelle d'Internet transforme-t-elle le monde ? Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).

⁵ Ibid.

⁶ Ibid.

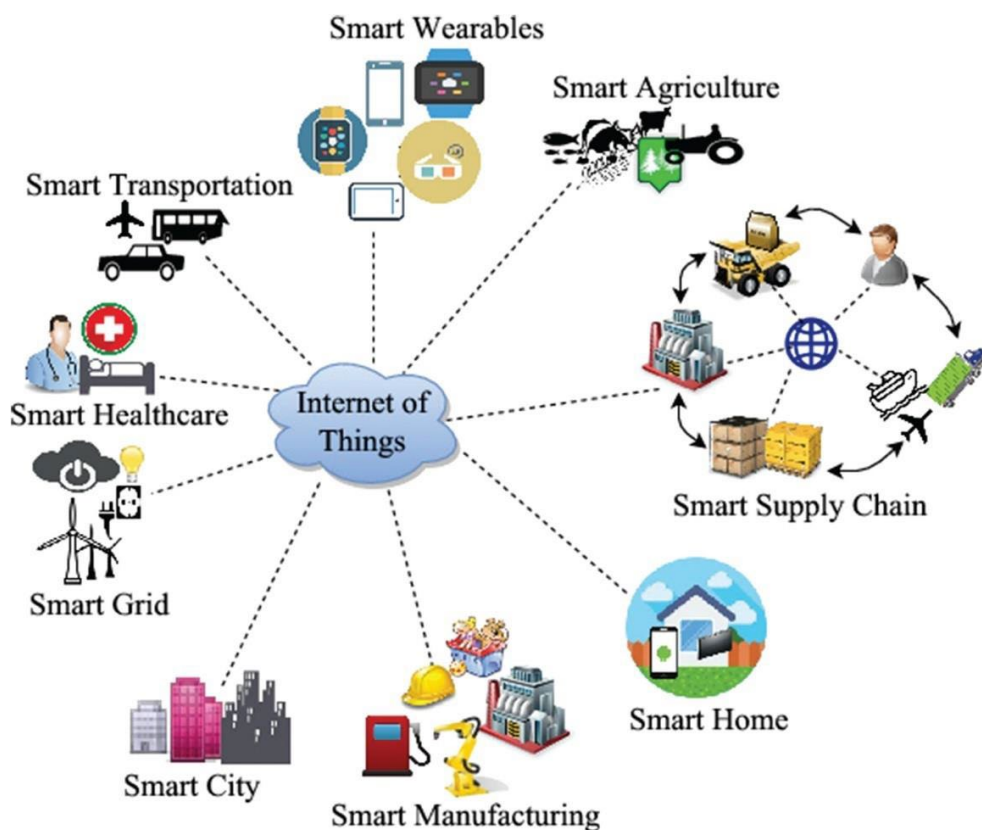
2.2.2. Différence avec d'autres technologies industrielles

Les technologies avancées se différencient, mais il existe un point commun qui part toujours de l'Internet des objets. Cela concerne les technologies avancées comme la simulation cyber physique. En revanche, pour les technologies traditionnelles, nous pouvons toujours remarquer un manque de connectivité. L'IdO, établie sur l'interconnexion de l'information, repose sur la connexion au réseau Internet, ce qui facilite l'envoi des données en temps réel et la surveillance à distance.

2.3. Formes d'application de l'Internet des objets (IoT)

De nos jours, l'Internet des objets est influencé par divers cas d'utilisation qui sont examinés en parallèle dans les sphères scientifique et industrielle, ce qui est illustré dans la figure 18.

Figure 18 : Formes d'application de l'Internet des objets



Source : (Bouchareb, 2023)

Chaque individu détient ses propres buts et limitations uniques. C'est pourquoi il est essentiel d'envisager l'Internet des objets non pas à travers le prisme d'une application spécifique, mais

comme la fusion des exigences d'une variété de scénarios différents. Certains scénarios peuvent se dérouler dans des environnements privés où les interactions avec l'extérieur sont étroitement surveillées ; d'autres se situent dans des lieux publics ouverts à tous (comme la localisation des places de stationnement libres), avec toute une gamme subtile entre ces extrêmes¹.

Parmi les différentes formes d'existence de l'ido, mentionnons :

2.3.1. Ville intelligente (Smart City)

Dans La croissance de la population due à l'urbanisation nécessite un approvisionnement adéquat en ressources et une communication modélisée via des plateformes numériques. Cela renforce le besoin de développer des paradigmes de ville intelligente. Un environnement de ville intelligente permet des avancées technologiques dans les domaines résidentiel, commercial, de la gouvernance et de la communication industrielle, en facilitant l'accès et le partage des ressources. Dans un tel environnement, les ressources et la communication sont distribuées et peuvent être accessibles via des supports numériques, allant de bribes d'informations issues de capteurs à d'immenses bases de données. Le partage et la disponibilité des ressources constituent des exigences fondamentales dans un environnement de ville intelligente afin d'assurer des services et des applications ubiquitaires. Les données sont recueillies depuis de minuscules capteurs jusque de vastes dispositifs de stockage grâce aux fonctions de détection, de collecte et d'actionnement des objets intelligents et des humains².

Le pilier fondamental de l'environnement de la ville intelligente est l'Internet des objets (IoT). L'IoT conçoit les ressources et autres informations sous forme numérique pour faciliter la communication entre différents types d'utilisateurs et d'appareils. Afin de garantir un accès facile à l'information et des services ubiquitaires, les utilisateurs peuvent directement interagir avec les ressources en exploitant les architectures IoT³.

¹ Bouchareb, A. (2023, avril). *Développement d'une architecture flexible pour la gestion et la sécurité des transactions et flux de données pour les objets connectés dans le contexte de la maison intelligente* [Mémoire de master, Université du Québec].

² Li, D., Deng, L., Liu, W., & Su, Q. (2020). *Improving communication precision of IoT through behavior-based learning in smart city environment*. *Future Generation Computer Systems*, 108, 512–520.

³ Ibid.

Les mesures de sécurité conçues pour les villes intelligentes doivent garantir l'intégrité des données publiques et privées ainsi qu'un accès authentifié aux ressources. Comme l'information est disponible instantanément, les risques de falsification ou de corruption des données publiques et privées par un adversaire sont accrus¹.

2.3.2. Réseaux intelligents (Smart Grids)

Les logiciels² permettent aux composants du réseau électrique intelligent d'être simultanément multifonctions (ou du moins hautement configurables) et gérables à distance. C'est précisément cela qui permet au réseau intelligent de passer d'un modèle traditionnel, statique et centralisé de production et de distribution d'énergie à un modèle dynamique, bidirectionnel et décentralisé. Ce dernier est orienté vers la périphérie et plus proche du consommateur, pour la production, le stockage et la gestion de l'énergie³.

En termes simples, grâce aux logiciels et à leur configuration, les composants du réseau intelligent disposent de fonctions qui s'adaptent au fil du temps aux flux d'énergie locaux. Ces fonctions s'adaptent également à la demande, à la consommation et aux tendances contextuelles plus larges⁴.

2.3.3. Réseau industriel intelligent (Smart Manufacturing)

La fabrication intelligente est devenue un sujet d'intérêt majeur parmi les professionnels de l'industrie manufacturière et les chercheurs ces derniers temps. Elle implique l'intégration de technologies de pointe telles que l'Internet des objets et l'informatique en nuage. Cela se manifeste explicitement dans le cadre de l'Industrie 4.0. Ainsi, la nouvelle génération de

¹ Baskar, S., Periyayagi, S., Mohammed Shakeel, P., & Dhulipala, V. R. S. (2019). *An energy persistent range-dependent regulated transmission communication model for vehicular network applications*. *Computer Networks*, 152, 144–153.

² Comme les logiciels de gestion de réseau, tels que SCADA, utilisés pour la supervision et le contrôle à distance des équipements, et les logiciels d'analyse et d'optimisation, comme OpenDSS, permettant la simulation et l'analyse des réseaux de distribution, ainsi que d'autres solutions assurant la gestion des compteurs intelligents, l'intégration des données, ou encore la cybersécurité du réseau intelligent.

³ Smart Energy International. (2019, 23 octobre). *How Smart Grid Operations, aligned to ITIL, can enable the Smart Energy Transition*. Smart Energy International. Consulté le 10 mai 2025 sur <https://www.smart-energy.com/features-analysis/getting-ready-to-operate-the-smarter-grid/amp/>

⁴ Ibid.

fabrication intelligente illustre une profonde combinaison des technologies d'intelligence artificielle (IA) et des technologies de production avancées. Elle est intégrée à chaque étape du cycle de conception, de production, de produit et de service, influençant l'ensemble du cycle de vie. Cette forme évoluée de fabrication intelligente constitue le moteur central de la nouvelle révolution industrielle et devrait devenir le principal catalyseur de la transformation et de l'amélioration de l'industrie manufacturière pour les générations futures. La conceptualisation des notions de fabrication intelligente¹, adaptable, durable et sécurisée à différentes étapes du processus industriel se voit dans un modèle 4*S².

2.3.4. Réseau de santé intelligent (Smart Healthcare)

Un réseau de santé intelligent est un concept qui relève du système médical. Ces systèmes intègrent des technologies avancées telles que des dispositifs portables, l'Internet des objets médicaux (IoMT – Internet of Medical Things), des algorithmes d'apprentissage automatique et des technologies de communication sans fil. Ces innovations permettent un accès fluide et sécurisé aux dossiers médicaux³.

La technologie la plus utilisée dans ce domaine, et qui constitue la principale problématique ici, est l'Internet des objets médicaux. Les solutions et méthodes développées pour fusionner et connecter les données collectées par les dispositifs médicaux représentent le principal défi aujourd'hui⁴.

La figure numéro 19 illustre les différentes parties d'un système de santé intelligent.

¹ Smart (intelligente), Scalable (adaptable), Sustainable (durable) et Secure (sécurisée).

² Swaroop, A., Polkowski, Z., Correia, S. D., & Virdee, B. (2023, 29 décembre). *Proceedings of Data Analytics and Management* (Vol. 4). Springer Singapore. Lecture Notes in Networks and Systems. ICDAM 2023.

³ Muhammad, G., Alshehri, F., Karray, F., El Saddik, A., Alsulaiman, M., & Falk, T. H. (2021, décembre). *A comprehensive survey on multimodal medical signals fusion for smart healthcare systems*. *Information Fusion*, 76, 355–375. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1566253521001330>

⁴ Ibid.

Figure 19 : Aperçu du système de santé intelligent



Source : (Ibid.)

2.4. L'intégration d'un système IoT

Bien que le concept de l'Internet des objets repose sur la connexion entre les différents appareils électroniques, il est essentiel de souligner que, pour que cette connectivité fonctionne correctement, une méthode appropriée d'intégration des OC est nécessaire.

Pour incorporer des dispositifs connectés de manière globale avec tout type d'équipement, il faut plusieurs étapes distinctives. Dans un premier temps arrive l'identification individuelle de chaque appareil connecté (utilisation des adresses IPv6 ou IPv4¹). Par la suite intervient la mise en place des capteurs et l'installation des équipements requis².

Ensuite vient l'étape où les objets sont connectés ensemble en établissant une interaction entre eux (par exemple via le Bluetooth). Enfin, toutes les données collectées par les divers appareils

¹ IP (traduit de Hostwinds, 2024) est un identifiant d'un type de protocole Internet, il représente le rôle d'un identificateur unique qui concerne tout équipement lié à un réseau. D'une manière plus simple, IP est une méthode d'adressage numérique qui facilite aux ordinateurs, téléphones et tous équipements numériques de détecter leur emplacement et de communiquer entre eux dans un seul réseau.

² Saleh, op. cit.

sont regroupées dans un réseau centralisé unique grâce à des protocoles comme HTTP ou REST¹.

Nous expliquant ces derniers dans le tableau numéro 10 (adapté de Gupta, 2025 et MDN Web Docs, 2024).

Tableau 10 : Tableau explicatif des différences entre HTTP et REST

Élément	Explication
Définition	HTTP est un langage de communication sur le web. REST est une méthode d'organisation pour faire communiquer des applications.
Rôle	HTTP permet d'envoyer et recevoir des informations. REST utilise HTTP pour partager ou récupérer des données entre systèmes.
Utilisé par	HTTP est utilisé par les navigateurs (Chrome, Firefox...). REST est utilisé par les applications mobiles, sites web, etc.
Exemple concret	HTTP : ouvrir une page web. REST : une appli météo demande la température à un serveur.
Format de données	HTTP transporte du texte, des images, etc. REST envoie des données structurées comme JSON ou XML.
Fonctions courantes	HTTP utilise GET, POST, PUT, DELETE. REST repose sur ces méthodes pour gérer les données.
Relation entre eux	HTTP est la base. REST utilise HTTP pour fonctionner.

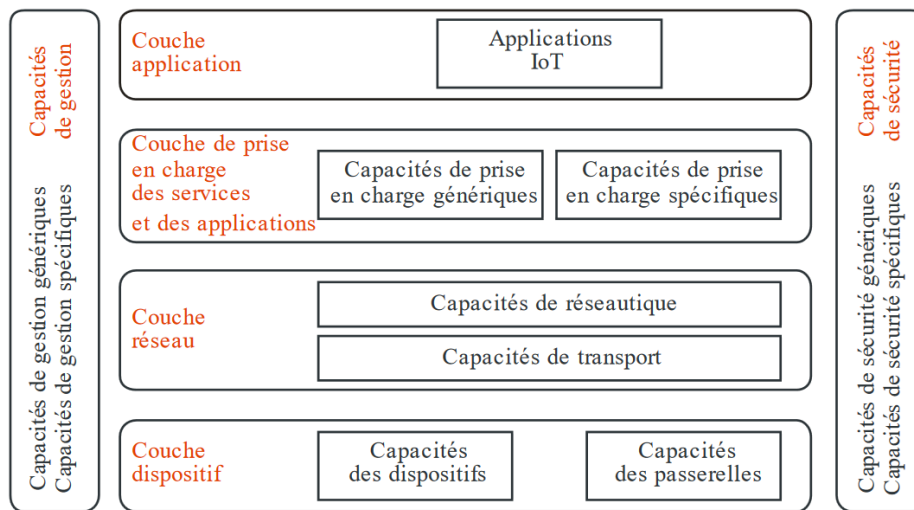
Source : Adapté de (Gupta, 2025 et MDN Web Docs, 2024)

2.4.1. Le modèle de référence de l'IoT

La figure 20 montre le schéma de l'IoT tel qu'il a été défini par l'Union internationale des télécommunications (UIT). Ce schéma est composé de quatre niveaux qui intègrent des fonctionnalités de gestion et de protection des données.

¹ Ibid.

Figure 20 : l'architecture fonctionnelle d'un système IoT



Source : (Bouchareb, op. cit.)

1. Couche dispositif (tout en bas) : c'est la base, où nous trouvons les OC eux-mêmes. Ces objets observent et agissent dans le monde réel.

Les objets connectés peuvent être : des capteurs (capteurs de température par exemple), des appareils (caméra, smartwatch).

2. Couche réseau : ici, l'objectif est de transférer les données aux récepteurs nécessaires. À titre d'exemple, si un capteur détecte une température X, l'information va être transférée à l'emplacement adéquat.

3. Couche de prise en charge des services et des applications : cette étape démarre une fois les données collectées par divers capteurs reçues. Ces informations seront ensuite traitées de manière à être organisées et stockées pour transformer les données en informations utiles.

Restons dans le même exemple de la température : supposons que le capteur détecte et envoie un signal indiquant une température élevée X ; alors cette couche peut automatiquement activer un ventilateur (prendre une décision).

4. Couche d'application (en haut) : cette couche incarne l'interaction utilisateur et l'utilisation finale des données de l'IoT. Cette interface peut être une application mobile ou web, une notification ou même un tableau de bord. C'est la représentation concrète de l'intégration réelle des capteurs intelligents.

5. De chaque côté se distinguent deux catégories de compétences possibles¹ : celles qui sont générales (applicables à toutes les couches) et celles qui sont spécifiques à des couches particulières :

- capacités de gestion (sur le côté gauche) : il s'agit des actions directrices.
- capacités de sécurité (à droite) : cela concerne les mesures de surveillance.

2.4.2. Les normes et standards de communication

Les normes de communication jouent un rôle essentiel dans la facilitation des échanges entre les divers acteurs au sein des réseaux de l'Internet des objets (IdO). Voici quelques-unes des normes IEEE 802 liées à l'Internet des objets² :

2.4.2.1. La norme IEEE 802.11

IEEE 802.11 est une composante de la série de normatives techniques IEEE 802 pour les réseaux locaux (LAN), les protocoles de contrôle d'accès au support (MAC) et la couche physique (PHY), utilisés pour mettre en œuvre la communication sans fil des réseaux locaux informatiques (WLAN). Cette normative établit divers critères de couche physique (PHY) pour permettre la connectivité sans fil des stations fixes, portables et mobiles (STATION) dans un environnement local.

2.4.2.2. La norme IEEE 802.15.15

Cette directive établit que la couche physique (PHY) et la sous-couche de contrôle d'accès au support (MAC) sont employées pour permettre une connectivité sans fil en mode réseau spontané avec des équipements fixes, portables et mobiles à consommation énergétique négligeable. Les couches physiques (PHY) sont définies pour les dispositifs opérant dans divers domaines réglementaires.

¹ Bouchareb, op. cit.

² Ibid.

2.4.2.3. La norme IEEE 802.15.4

Dans cette normative particulière se retrouvent les descriptions des couches MAC et PHY façonnées pour répondre à différents impératifs tels qu'un haut débit de données, aussi bien qu'une demande énergétique réduite et une latence minimale. Le réseau sans fil pour les capteurs corporels tire profit du protocole d'accès multiple le plus fréquemment adopté : le « *Carrier Sense Multiple Access (CSMA/CA)* », qu'on retrouve dans les récits des réseaux sans fil avec la fonctionnalité d'évitement des collisions. Cela facilite la communication entre les dispositifs tout en minimisant le risque d'interférences simultanées ou non voulues dans le système sans fil¹.

2.4.3. Les technologies de l'IoT

L'IoT permet l'interconnexion des différents objets intelligents via l'Internet. Ainsi, pour son fonctionnement, plusieurs systèmes technologiques sont nécessaires. L'IoT désigne diverses solutions techniques (RFID, TCP/IP, technologies mobiles, etc.) qui permettent d'identifier des objets, de capter, de stocker, de traiter et de transférer des données dans les environnements physiques, mais également entre des contextes physiques et des univers virtuels. En effet, bien qu'il existe plusieurs technologies, celles-ci sont utilisées dans le fonctionnement de l'IoT².

2.4.3.1. NFC (Near Field Communication)

Les protocoles NFC sont fondés sur la technologie d'identification par radiofréquence RFID. Les objets équipés d'une puce électronique RFID possèdent une « étiquette » et sont automatiquement identifiés par radiofréquence lorsqu'ils se trouvent à proximité d'un équipement appelé interrogateur. Le protocole NFC est un standard de communication radiofréquence sans contact à très courte distance, de l'ordre de quelques centimètres, qui permet une communication simple entre deux équipements électroniques³.

¹ Ibid.

² Hijdeb, A. (2017). *Implémentation d'un protocole d'élection d'un serveur d'authentification dans l'internet des objets* (Mémoire de fin de cycle Master 2 en Informatique Professionnel, option ASR : Administration et Sécurité des Réseaux). Université Abderrahmane Mira, Bejaïa.

³ Ibid.

2.4.3.2. Bluetooth

Inventé en 1994 par la société suédoise Ericsson, le protocole Bluetooth est un standard de transfert de données sans fil. Il utilise une faible bande passante, ce qui ne lui permet de transférer que peu de données à de courtes distances, mais est également très peu énergivore. Inclus à l'immense majorité des téléphones mobiles, afin de réaliser une communication entre deux téléphones, ou entre un téléphone et un objet connecté de nature différente, il possède désormais de nombreuses applications : oreillette de discussion téléphonique sans fil, montre intelligente, moniteur de fréquence cardiaque, etc.¹

2.4.3.3. Wi-Fi

Le Wi-Fi désigne un ensemble de protocoles de communications sans fil, permettant des connexions à haut débit sur des distances de 20 à 100 mètres. Il s'agit d'un réseau local sans fil très énergivore, qui ne convient que pour les appareils branchés sur secteur ou dont l'alimentation électrique peut être aisée et fréquente. Il permet de transférer rapidement beaucoup de données².

2.4.4. Les limites de l'intégration de l'IoT

Les entreprises bénéficient grandement de l'adoption des technologies de l'Internet industriel des objets (IoT). Elles bénéficient d'une meilleure intelligence, d'une prise de décision plus éclairée, d'une productivité accrue, d'une gestion optimisée des actifs, et bien plus encore. Mais comme pour la plupart des choses, ces avantages s'accompagnent d'inconvénients majeurs. Après tout, il s'agit d'accroître la complexité d'un système³.

¹ Ibid.

² Ibid.

³ 3Pillar Global. (2020, 7 avril). *Industrial IoT – Challenges, Risks & Pitfalls*. Consulté le 12 mai 2025, sur <https://www.3pillarglobal.com/insights/blog/industrial-iot-challenges-risks-pitfalls/>

2.4.4.1. Coût d'investissement élevé

L'un des défis les plus évidents de l'IoT industriel est son coût d'adoption élevé. Certes, l'une des principales promesses de l'IoT est de réduire les coûts grâce à une meilleure gestion des actifs, à l'accès à la veille stratégique et à des gains de productivité. Cependant, il est difficile pour les organisations de justifier le coût lorsque¹ :

- elles ne sont pas entièrement sûres du type de retour sur investissement à attendre ;
- et elles n'ont pas d'expérience dans la mise en œuvre de systèmes connectés.

Selon le rapport IoT Signals 2019 de Microsoft, 29 % des organisations ont indiqué que le manque de ressources était l'une des principales raisons pour lesquelles elles retardaient l'adoption de l'IoT².

2.4.4.2. Pannes de connectivité

L'un des éléments clés que les entreprises doivent prendre en compte avant de se lancer dans la grande transformation de l'IIoT est le besoin d'une connectivité constante et ininterrompue.

Le défi est que, même si l'on ne parle que d'une disponibilité Internet ininterrompue, atteindre une disponibilité de 100 % est quasiment impossible. Que ce soit pour des raisons de maintenance ou autres, la connexion peut être interrompue à un moment ou à un autre. Les organisations devront donc trouver un fournisseur adapté pour répondre à leurs besoins de connectivité afin d'éviter les interruptions de service³.

2.4.4.3. Combiner l'infrastructure héritée et l'infrastructure IoT

Plus le système IoT est complexe, plus il y a de chances que les administrateurs informatiques et les ingénieurs OT aient la visibilité, l'accès et le contrôle sur chaque élément mobile de l'écosystème.

¹ 3Pillar Global. (2020, 7 avril). Industrial IoT – Challenges, Risks & Pitfalls. Consulté le 12 mai 2025, sur <https://www.3pillarglobal.com/insights/blog/industrial-iot-challenges-risks-pitfalls/>

² Ibid.

³ Ibid.

À mesure que les organisations déploient des appareils IoT sur des équipements existants et divers appareils fabriqués par différentes entreprises, il devient extrêmement difficile pour les employés de surveiller et de contrôler le fonctionnement de bout en bout.

Conclusion

Ce chapitre a permis de mieux comprendre les fondements de la quatrième révolution industrielle et les transformations majeures qu'elle a engendrées au sein des entreprises industrielles. L'Industrie 4.0, en intégrant des technologies numériques avancées, a ouvert la voie à une production plus intelligente, plus automatisée et plus performante. Parmi ces technologies, l'Internet des objets (IoT) occupe une place centrale, en permettant une interconnexion en temps réel des équipements, des systèmes et des données. Cette évolution technologique marque un tournant décisif dans la manière de concevoir, de gérer et d'optimiser les processus de production, en réduisant significativement les erreurs humaines, en améliorant la qualité des produits et en renforçant la compétitivité des entreprises. Cette réflexion constitue ainsi une base solide pour approfondir l'impact de l'IoT dans des secteurs spécifiques, notamment dans le domaine pharmaceutique.

Chapitre 3

*Environnement professionnel et état de
l'art*

Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter l'étude réalisée au sein de l'entreprise étudiée. Avant d'aborder l'aspect pratique de notre recherche, nous commencerons par une présentation générale de l'entreprise, en nous concentrant sur le groupe Ms Pharma et plus spécifiquement sur l'entreprise El Kendi. Dans la première section, nous fournirons un aperçu organisationnel de l'entreprise, en détaillant ses missions, ses objectifs et le rôle stratégique de la fonction production au sein de l'organisation.

La deuxième section sera dédiée à une revue de littérature, où nous aborderons les travaux connexes liés à l'Internet des objets (IoT), aux capteurs intelligents, ainsi qu'aux concepts de Machine to Machine (M2M).

Section 1 : Présentation de l'organisme d'accueil

Dans cette section, nous présentons le secteur pharmaceutique en Algérie, en abordant ses caractéristiques, ses exigences, son marché ainsi que les principaux concurrents présents sur le territoire. Ensuite, nous introduirons le groupe MS Pharma ainsi que l'entreprise El Kendi, en exposant son historique, ses activités, ses différents départements, et enfin, nous préciserons l'emplacement de la fonction production au sein de l'entreprise El Kendi.

1.1. Aperçu du secteur pharmaceutique en Algérie

Le marché pharmaceutique algérien semble être le plus important en Afrique et même parmi les premiers dans la région du MENA¹.

Après son ouverture à la concurrence, ce marché ne cesse d'attirer l'investissement des plus grandes firmes pharmaceutiques internationales ainsi qu'un grand nombre d'entreprises nationales car il présente, encore, un grand potentiel de croissance.

D'après Zhengchun², les médicaments génériques³ représentent 75 % des produits pharmaceutiques fabriqués localement en Algérie.

¹ Middle East and North Africa

² He, Z. (2022, 21 janvier). Algeria Pharma Market. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/algeria-pharma-market-zhengchun-harry-he/>

³ Des médicaments qui peuvent être : des copies conformes du médicament original, des médicaments similaires qui peuvent avoir des excipients différents, et des médicaments assimilables qui doivent prouver leur bioéquivalence. En notant qu'en Algérie n'y a pas de laboratoires de recherche pharmaceutiques (création des médicaments originaux), y a seulement des laboratoires génériqueurs (generic drug manufacturing) comme Biopharm, El Kendi et Saidal.

1.1.1. Caractéristiques de l'industrie pharmaceutique en Algérie

L'industrie pharmaceutique algérienne est un secteur dynamique caractérisé par plusieurs caractéristiques clés. Parmi ces derniers, nous mentionnons :

1.1.1.1. Mise en œuvre des accords ADPIC

L'Accord sur les ADPIC (Aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce) protège l'industrie pharmaceutique, car elle joue un rôle crucial dans la promotion de la santé publique et s'appuie fortement sur la recherche. Cela se fait en appliquant le système des brevets pour la découverte de nouveaux médicaments, interdisant aux autres laboratoires pharmaceutiques de reproduire le médicament avant la fin de la période de protection. Néanmoins, le titulaire du brevet peut le céder à des tiers et conclure des accords de licence¹.

1.1.1.2. L'exigence des investissements élevés et des technologies avancées

Les plus vastes laboratoires mondiaux se caractérisent par leurs capitaux considérables et leur monopolisation technologique, grâce à des investissements dans des innovations et des inventions qui leur confèrent des droits de brevet² (traduit de Fatima, 2016, p. 136).

1.1.1.3. Dépendance à la spécialisation et à l'expertise accumulées au fil des années

Les organisations opérant dans ce domaine se divisent entre la spécialisation dans la fabrication de médicaments difficiles à concurrencer, la concentration de leurs activités et de leurs produits sur un segment de marché spécifique, ou la spécialisation exclusive dans les médicaments onéreux (traduit de Fatima, 2016, p. 136).

1.1.1.4. Produits sur le marché local

Les produits pharmaceutiques sur le marché local sont génériques. Ces derniers représentent généralement des copies conformes du médicament original, offrant la même efficacité et la même qualité. Il est garanti comme tous les autres médicaments, car il est soumis au même

1. بعوني، ل. (2021). الصناعة الصيدلانية في الجزائر. مجلة القسطاس للعلوم الإدارية والاقتصادية والمالية، 3(1)، 70-90.

2 Le brevet représente ici un titre de protection de la propriété industrielle.

processus de contrôle et au même suivi. Ce type de médicament permet le traitement de nombreuses maladies à court ou à long terme telles que le diabète et le cholestérol¹.

1.1.2. Vue d'ensemble du marché pharmaceutique en Algérie

Le marché pharmaceutique algérien est stable, largement dominé par les entreprises locales, et repose presque exclusivement sur le circuit de détail. La croissance est modeste, mais la part importante des acteurs nationaux suggère une industrie locale dynamique. Tout cela est expliqué dans le tableau numéro 11, élaboré à partir du rapport IQVIA².

Tableau 11 : Marché pharmaceutique en Algérie 2024

Indicateur	Explication
Valeur des ventes	Le marché pharmaceutique algérien a atteint 2,5 milliards USD sur la période de 12 mois se terminant au premier trimestre 2024. Cela représente les ventes en valeur au niveau 'ex-usine', c'est-à-dire avant toute marge ou remise.
Croissance en valeur (PPG)	La croissance par rapport à la même période de l'année précédente (MAT Q1 2023) est de +2,3 %. Cela signifie que le marché a légèrement progressé, ce qui reflète une certaine stabilité mais une croissance modérée.
Canaux analysés	Seul le canal de détail (retail) a été pris en compte de considération. Cela inclut les pharmacies et les établissements de vente au détail de médicaments, mais pas les hôpitaux ou les appels d'offres publics.
Part de marché MNC vs Local	Les entreprises locales détiennent 60 % de la valeur des ventes, tandis que les multinationales (MNC) en détiennent 40 %. Cela indique une forte présence de producteurs locaux dans le marché algérien.
Type de canal (Retail vs Institutional)	Le marché algérien est couvert à 100 % par les ventes au détail, sans données institutionnelles (comme les ventes hospitalières ou publiques), ce qui reflète une dépendance des données sur le circuit privé.

Source : Adapté de (IQVIA, 2024)

¹ حديدي، ف.، & بربار، ن. (2023). مساهمة الدولة في دعم وتطوير المنتجات المحلية: دراسة حالة قطاع الصناعات الصيدلانية. مجلة أبحاث اقتصادية معاصرة، 6(1)، 43-64.

² IQVIA. (2024, juillet). *Middle East & Africa pharmaceutical market insights* (32e éd.) [rapport en ligne]. Consulté le 15 mai 2025, sur https://file:///C:/Users/VIP17JUN24/Downloads/240709_iqvia_mea-pharmaceutical-market-quarterly-report_q1-2024.pdf

1.1.3. Concurrents dans le secteur de l'industrie pharmaceutique en Algérie

Le secteur pharmaceutique en Algérie est très prospère et attire de nombreuses entreprises locales et étrangères qui opèrent souvent sous forme de partenariats mixtes.

Les sociétés pharmaceutiques veillent à approvisionner en médicaments en les produisant sur place ou en les important de leurs maisons mères, dans le cas des filiales de sociétés étrangères installées en Algérie mais ne disposant pas d'une production locale.

Les laboratoires pharmaceutiques présents en Algérie sont nombreux et différents, et les laboratoires étrangers partagent le classement avec les laboratoires algériens.

1.1.3.1. Les laboratoires pharmaceutiques présents en Algérie

Leur nombre dépasse la centaine de laboratoires, assurant ainsi la diversité de l'offre de médicaments et, par la même occasion, l'encouragement de la consommation.

- Le laboratoire **public SAIDAL**¹: est le premier laboratoire pharmaceutique producteur de médicaments génériques en Algérie. Il a été créé en 1982 et son capital est détenu à 80 % par l'État algérien, les 20 % restants sont détenus par des investisseurs institutionnels et des personnes physiques. Il est aujourd'hui un groupe spécialisé dans le développement, la production et la commercialisation de produits pharmaceutiques à usage humain.

SAIDAL s'appuie sur le partenariat avec de grands laboratoires étrangers afin d'acquérir le savoir-faire et de disposer de la technologie nécessaire pour élargir sa gamme avec des produits de plus en plus innovants.

¹ Khammes, A., & Douiou, M. (2021). *Le développement de la production locale de produits pharmaceutiques, en Algérie, une opportunité de croissance pour le groupe HYDRAPHARM* (Mémoire de master en management stratégique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou), p. 50-56.

- Des laboratoires **nationaux privés**, tels que¹:

- ▶ Le laboratoire **INPHA MédiS** : une société par actions, entrée en production en 2005, située à El Tarf et dont le siège social est à Annaba.

Ce laboratoire est organisé en trois départements : un département pour la fabrication des formes liquides (sirops et suspensions buvables), un département dédié aux formes sèches (gélules et comprimés) et un département spécifique dédié au conditionnement des produits stériles injectables.

Le laboratoire INPHA MédiS est lancé de façon active dans le partenariat avec les laboratoires tunisiens MédiS. Parmi ses produits, nous citons l'hypocholestérolémiant et hypotriglycéridémiant ATOR, les antihistaminiques H1 Clardine et Deslor, et l'antidiarrhéique INPHADIUM.

- ▶ Le laboratoire **NOVA PHARM TRADING** : Il a été fondé en 1995 et est situé dans la zone industrielle de Bousmaïl, dans la wilaya de Tipaza.

Il dispose d'une unité de production de différentes formes galéniques, d'un laboratoire de recherche & développement et d'un laboratoire de contrôle de qualité agréé par le Laboratoire National de Contrôle des Produits Pharmaceutiques.

En plus de sa gamme thérapeutique variée (diabétologie, neurologie-psychiatrie, stomatologie, ORL, parasitologie, urologie, rhumatologie, métabolisme et nutrition), le laboratoire fabrique une large gamme de compléments alimentaires (Vita Nova D3, Vita Nova Magnesium, Nova Zinc) qu'il est possible de commander sur sa boutique en ligne NOVA LIFE.

- ▶ Le laboratoire **MERINAL** : En 1997, la pharmacie MELLAH, exerçant depuis 1969, crée la société MERINAL. En 2002, MERINAL lance son activité de production sous licence dans la zone industrielle d'OUED SMAR, Alger. En 2004, elle lance la production de son premier médicament générique et, en 2007, débute ses activités d'exportation.

¹ Ibid.

MERINAL est spécialisée dans la production de médicaments sous forme sèche (comprimés, gélules et sachets) dans 9 domaines thérapeutiques tels que les antalgiques, les anti-infectieux, la gynécologie, et le système cardiovasculaire. Actuellement, MERINAL fabrique 66 médicaments dans différents domaines thérapeutiques.

En 2016, MERINAL a exporté près d'un million de boîtes vers sept pays africains et est en phase d'augmenter ses investissements pour accroître ses parts d'exportation.

► Le laboratoire **LGPA** : Il a été créé en 1997, d'abord comme représentant de laboratoires étrangers en Algérie et importateur de leurs produits, puis comme producteur à partir de 2000.

Parmi les produits de LGPA : GASTRIUM et EUCARBON dans la gastro-entérologie, RUMIFEN dans la pédiatrie, BRONCHOCALM dans la pneumologie et DERMAFINE dans la dermatologie.

- Des laboratoires **nationaux privés diversifiés**¹ : ils maîtrisent des activités autres que la production et la commercialisation de leurs propres produits ; ils s'occupent de la distribution et de la promotion des médicaments de tous les laboratoires existants en Algérie, ainsi que de l'importation des produits des laboratoires étrangers présents en Algérie ou non.

► Le groupe **Hydra Pharm** : Créé en 1995, il compte, en plus de sa filiale AT PHARMA dédiée à la fabrication des médicaments princeps en partenariat avec des laboratoires étrangers et à l'importation, d'autres filiales comme CEGEDIS, dédiée uniquement aux médicaments génériques, et les six filiales régionales dédiées à la distribution de tous les produits pharmaceutiques des laboratoires fabriquant en Algérie ou même issus de l'importation. Exemple de la filiale de distribution ABC MED à Tizi-Ouzou.

Hydra Pharm dispose aussi d'une filiale nommée CARPE DIEM, destinée à la promotion des produits pharmaceutiques au niveau des pharmacies ou des centres de soins ; elle organise des animations et des visites pour faire connaître ou promouvoir les produits des différents laboratoires.

¹ Ibid.

► Le groupe **BIOPHARM** : en plus de la production de médicaments à travers sa filiale BIOPHARM, le groupe se compose d'une filiale dédiée à la distribution en gros de produits pharmaceutiques (BIOPHARM DISTRIBUTION), d'une autre dédiée à la répartition aux officines (BIOPURE), d'une filiale chargée de la promotion et de l'information médicale (HumanHealth Information), et enfin d'une filiale dédiée à la logistique pour l'industrie pharmaceutique (BIOPHARM LOGISTIC).

- Des laboratoires pharmaceutiques **étrangers**¹ : ce sont, en général, de grands laboratoires internationaux occupant les premières places mondiales, que ce soit en termes de chiffre d'affaires ou en degré d'innovation et d'investissements en R&D.

D'autres laboratoires étrangers, présents en force dans la région MENA à travers l'offre de génériques de qualité, ont investi le marché algérien et occupent les premières places parmi les producteurs locaux :

► Le laboratoire **Hikma Pharmaceuticals** : il est d'origine jordanienne et est présent dans plusieurs pays de la région du MENA. Il est présent en Algérie (HIKMA Pharma Algérie) depuis 1994, possède quatre usines de fabrication, emploie 700 employés et met 90 produits sur le marché algérien.

Parmi ses produits : NIDAZOLE 200 mg et 500 mg, qui sont des anti-infectieux ; NOPAIN 125 mg, 275 mg et 550 mg, qui sont des anti-inflammatoires ; NATRIXAL 1,5 mg, pour les maladies du cœur.

► Le laboratoire **El Kendi** : c'est la filiale algérienne du groupe MS Pharma (un groupement de plusieurs entreprises pharmaceutiques proposant des génériques de qualité dans différents pays arabes) et il est présent en Algérie depuis 2009. Fabriquant 192 produits (génériques) localement et employant 1 033 employés, El Kendi s'est transformé en plus grand investisseur en Algérie et occupe une place dans le top 3 des laboratoires pharmaceutiques présents.

¹ Ibid.

El Kendi propose des médicaments dans plusieurs domaines thérapeutiques tels que la rhumatologie, la dermatologie, et la cardiologie.

1.1.3.2. Classement des principaux producteurs pharmaceutiques en Algérie

Les données de vente des principaux producteurs pharmaceutiques pour l'année 2024 en Algérie dévoilent une distinction claire entre les principaux laboratoires pharmaceutiques présents sur le marché localisé du pays nord-africain selon leurs performances financières en millions de dollars américains ; de plus, elles mettent également en lumière le produit phare de chaque laboratoire médical¹.

En première position du classement figure El Kendi, en tête avec un chiffre d'affaires de 24 millions de dollars US grâce au médicament Exval, qui le propulse en avant. La société est suivie par Hikma et ses ventes de 18 millions de dollars US attribuées à Amoclan, puis par Novonordisk avec 18 millions de dollars US générés par Novorapid².

Sanofi se classe la quatrième avec un chiffre d'affaires de 14,4 millions USD, Pyostacine étant le produit en tête des ventes. Biocare Biotech suit de près avec une somme de 13,7 millions USD grâce à Glarus, tandis que Beker Laboratoires atteint les 13,6 millions USD grâce à TrombiX.

Pharmalliance et Biopharm ont réalisé des ventes respectives de 12 700 000 \$ (avec Esoproton) et de 12 400 000 \$ (avec Lomac). En descendant dans le classement se trouve Biocare Laboratoires, qui affiche un chiffre d'affaires de 8 800 000 \$ avec Bioclav, et Merinal se classe en douzième position avec un chiffre d'affaires de 8 400 000 \$, principalement grâce à Ferro Sanol Gyn³.

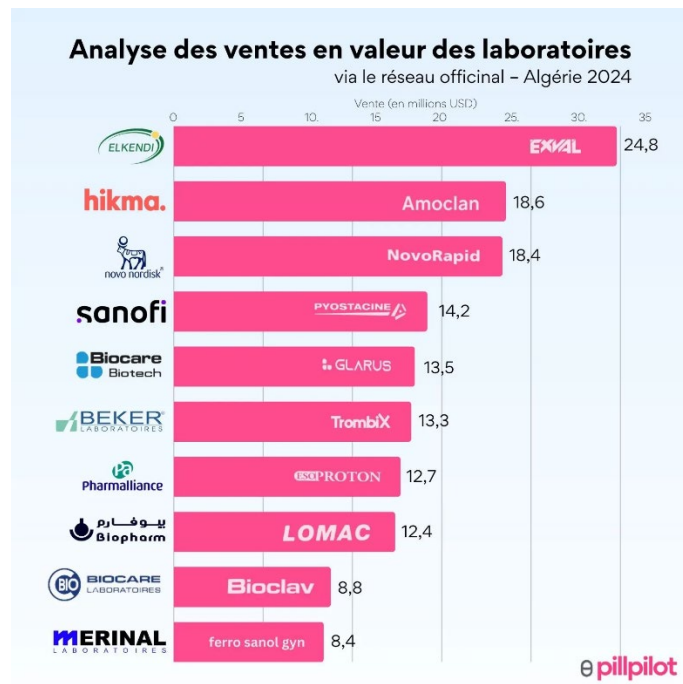
La figure numéro 21 illustre ce classement.

¹ Khoudour, N. (2025, 20 mai). Quels laboratoires dominent les ventes en pharmacie en 2024 ? Dans Pillpilot [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://pillpilot.net/quels-laboratoires-dominent-les-ventes-en-pharmacie-en-2024/>

² Ibid.

³ Ibid.

Figure 21 : Classement des laboratoires pharmaceutiques selon les ventes en valeur 2024



Source : (Ibid.)

1.2. L'entreprise Ms Pharma

M Pharma est une multinationale pharmaceutique spécialisée dans le développement, la production et la distribution de médicaments génériques et de spécialité. Fondée en 1989, l'entreprise est aujourd'hui un leader régional de l'industrie pharmaceutique au Moyen-Orient et en Afrique (MOA). Forte d'une croissance rapide, elle emploie plus de 2 000 collaborateurs répartis dans toute la région¹.

MS Pharma dispose d'une base technologique étendue, couvrant les formes solides orales (OSD), les liquides, les crèmes, les pommades ainsi que les produits stériles (injectables), dans l'ensemble des principaux domaines thérapeutiques².

¹ MS PHARMA. (s. d.). Global presence. Dans MS Pharma [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://www.mspharma.com/global-presence>

² Ibid.

Chiffres clés¹ :

- 300 DCI (dénominations communes internationales) ;
- plus de 2 000 AMM (autorisations de mise sur le marché) enregistrées ;
- plus de 90 autres produits (DCI)² en cours de développement et d'enregistrement.

MS Pharma est présente dans onze pays : Algérie, Jordanie, Koweït, Oman, Qatar, Arabie saoudite, Soudan, Irak, Bahreïn, Émirats arabes unis et Suisse. Elle est dirigée depuis son siège social à Amman (Jordanie) et son bureau exécutif à Zoug (Suisse).

La figure numéro 22 représente un aperçu de la présence mondiale de MS Pharma.

Figure 22 : Présence mondiale de Ms Pharma



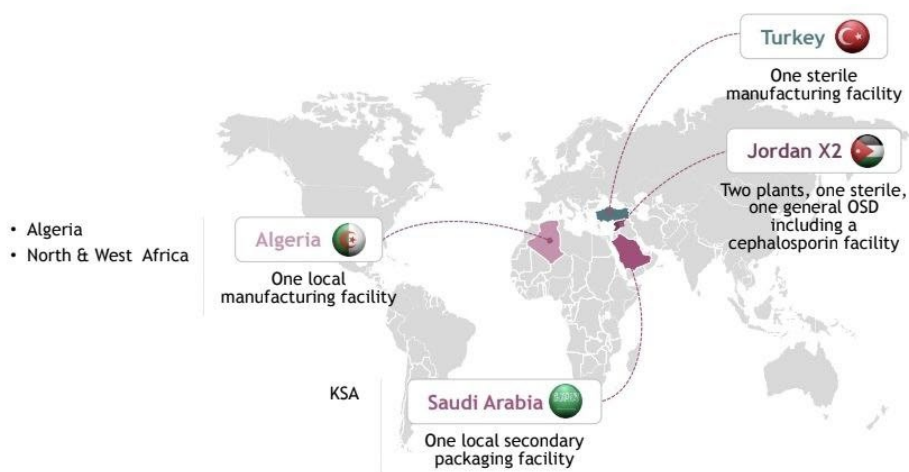
Source : (Ibid.)

MS Pharma dispose de trois centres de R&D et de cinq usines de fabrication dans la région MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord) : un centre de R&D en Algérie et deux en Jordanie ; une usine dans chacun des pays suivants : Algérie, Turquie, Arabie saoudite, et deux en Jordanie. Elle est également dotée de bureaux de vente et de marketing.

¹ Ibid.

² Selon l'organisation mondiale de la santé [OMS] (2017), la DCI facilite l'identification des substances pharmaceutiques ou des principes actifs. Chaque DCI est un nom unique, reconnu mondialement et appartenant au domaine public. Une dénomination commune est également appelée nom générique.

Figure 23 : Usines de production de Ms Pharma



Source : (Ms Pharma, 2022, p. 8)

1.2.1. Les valeurs de Ms Pharma

Selon l'équipe du groupe MS Pharma¹, la culture d'entreprise repose sur « *l'égalité des chances en matière d'emploi et la diversité, afin de favoriser un environnement inclusif* ».

Donc nous pouvons dire que ses valeurs comprennent² :

- le respect des personnes ;
- l'intégrité et la transparence ;
- la qualité et l'excellence ;
- le travail d'équipe.

¹ MS PHARMA. (s. d.). About Us. Dans Ms Pharma. [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://www.mspharma.com/about-us?mnuId=2943>

² Ibid.

1.2.2. La mission de Ms Pharma

L'équipe de l'entreprise Ms Pharma¹ déclare que la mission principale du groupe est « *d'améliorer la qualité de vie de nos communautés en facilitant l'accès à des produits de qualité et abordables* ».

1.2.3. La vision de Ms Pharma

L'orientation future de Ms Pharma² est de « *devenir une entreprise pharmaceutique internationale implantée au Moyen-Orient et en Afrique, et présente en Europe et sur d'autres marchés mondiaux* ».

1.3. Présentation de l'entreprise El Kendi

El Kendi³, filiale de MS Pharma, est le leader algérien de la fabrication de médicaments génériques, avec plus de 75 DCI (Dénominations Communes Internationales) sur le marché.

Avec plus de 1 000 employés hautement qualifiés et expérimentés, El Kendi a renforcé sa capacité de production pour répondre à la demande croissante du marché.

La figure numéro 24 montre les différents associés (personnes physiques ou morales) de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament.

Figure 24 : Les associés de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament selon le site Sidjilcom

Société							
Activité Exercée							
Associés Physiques							
Associés PM							
Modifications							
Nom /Prénom	Date de Naiss	Lieu Naiss	Qualité	Téléphone	Fax	Nationalité	
ABDELLAH ABDELAZIZ AHMED ABOU SAMAK	17/11/1986	JORDANIE	MEMBRE DU CA	-	-	Jordanien	
ACHI SOFIANE	11/10/1971	ALGER CENTRE	DG	-	-	ALGERIENNE	
AKIF TOUFIK JARDIJS DAÛD	20/06/1967	JORDANIE	PRESIDENT DU CA	-	-	Jordanien	
MEROUANE EL MOATAZ ABDELKRIM EL BALBISSI	26/02/1977	JORDANIE	MEMBRE DU CA	-	-	Jordanien	

Source : (Sidjilcom, s. d.)

¹ Ibid.

² Ibid.

³ Ibid.

L'adresse du siège social de l'entreprise¹ est située au 17, rue Mohamed Lazzouni, Douéra, Algérie (cette adresse concerne le bureau des ventes et du marketing).

Le déroulement de notre stage s'est effectué sur le site de fabrication, situé au n° 19, zone d'activité El Boustane, commune de Rahmania, Alger, Algérie.

Figure 25 : Photographie qui met en évidence le site de fabrication El Kendi à Rahmania



1.3.1. Historique de l'entreprise

El Kendi a parcouru un long chemin depuis sa création en 2007. Deux ans plus tard, le site a été lancé et, en 2010, l'entreprise a lancé sa première gamme de produits dédiée aux maladies chroniques. Cette étape a marqué un tournant majeur pour l'entreprise, qui est devenue, en 2015, le premier fabricant local en Algérie².

Aujourd'hui, avec une gamme impressionnante de références commercialisées, El Kendi s'est imposé comme une marque de confiance dans le secteur de la santé. Son engagement envers la qualité et l'innovation lui a permis de fidéliser sa clientèle et de poursuivre sa quête d'excellence dans toutes ses activités.

¹ Ibid.

² MS Pharma. (2022, 18 mai). El Kendi Product: Algerian Quality Generic, El Djazair Healthcare, Dakar, Senegal [présentation en ligne PDF]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://www.miph.gov.dz/fr/wp-content/uploads/2022/05/Le-produit-El-Kendi-Un-generique-Algerien-de-qualite.pdf>, p. 13.

La figure numéro 26 illustre le parcours historique de l'entreprise El Kendi.

Figure 26 : Historique de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament



Source : (Ibid., p. 13)

1.3.2. L'activité de l'entreprise

Les services proposés par El Kendi comprennent la fabrication et le conditionnement de médicaments¹.

La figure numéro 27 de la fiche technique de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament, sur le site principal du Centre nationale du Registre de Commerce [Cnrc], montre les différentes activités exercées par l'entreprise actuellement.

Figure 27 : Activités exercées par l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament

Société	Activité Exercée	Associés Physiques	Associés PM	Modifications
	Code Activité	Activité	Numéro d'Agrément	
	104224	FABRICATION DE COMPLEMENTES ALIMENTAIRES		
	104213	FABRICATION DES PRODUITS COSMETIQUES ET D'HYGIENE CORPORELLE.		
	608006	CONDITIONNEMENT DES PRODUITS COSMETIQUES ET D'HYGIENE CORPORELLE.		

Source : (Sidjilcom, s. d.)

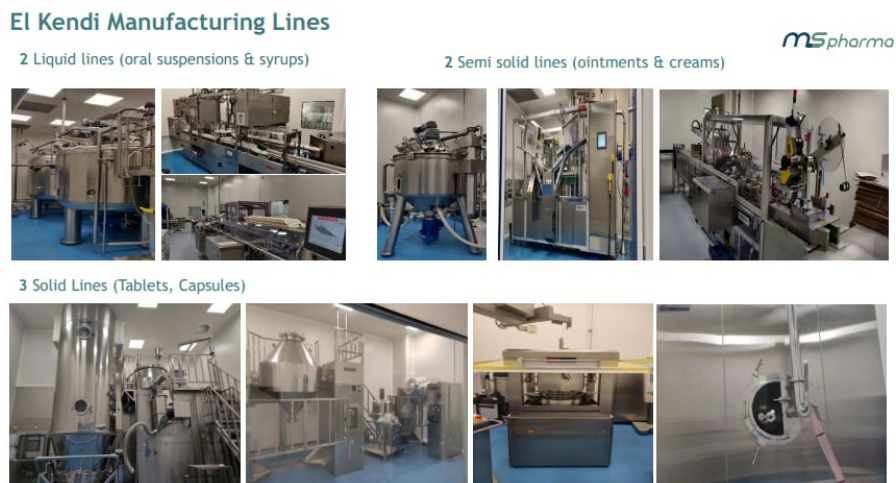
¹ Sidjilcom. (s. d.). *Fiche descriptive de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament*. Dans le site du Centre National du Registre du Commerce, [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://sidjilcom.cnrc.dz/repertoire-des-commerçants-detaille>

Le processus de conditionnement d'un médicament comporte plusieurs étapes critiques pour garantir la sécurité et l'efficacité du produit. Les produits pharmaceutiques produits par El Kendi se présentent sous trois formes¹ :

- Solides (comprimés et gélules) ;
- Semi-solides (pommades, crèmes et gels) ;
- Liquides (sirops).

La figure numéro 28 illustre les différentes lignes de production dans l'usine El Kendi, en montrant différents types de machines pour chaque étape de fabrication (granulation, compression, enrobage, et même conditionnement).

Figure 28 : Lignes de production d'El Kendi



Source : (Ms Pharma, 2022, op. cit., p. 16)

Une fois la fabrication terminée, les médicaments passent à l'étape du conditionnement. Cette étape comprend la création d'éléments matériels destinés à protéger le produit tout au long de son transport. Le processus de conditionnement comprend trois étapes² :

- Conditionnement primaire : il s'agit du contenant en contact direct avec le médicament, comme un blister, un flacon ou une ampoule.

¹ MS PHARMA. (s. d.), op. cit.

² Ibid.


- Conditionnement secondaire : il s'agit de l'emballage extérieur qui entoure l'emballage primaire, comme des boîtes ou des cartons, offrant une protection supplémentaire.
- Conditionnement tertiaire : il s'agit de l'emballage qui contient l'emballage secondaire, généralement sous la forme de cartons plus grands pour le transport et le stockage.

El Kendi s'assure que ses médicaments sont fabriqués et conditionnés selon les normes les plus strictes, afin de fournir des produits sûrs et efficaces qui répondent aux besoins de ses clients¹.

1.3.3. La fiche technique

Le tableau numéro 12 représente la fiche technique de l'entreprise.

Tableau 12 : Fiche technique de l'entreprise El Kendi

<i>SPA El Kendi</i>	
Nom commercial/Raison sociale	El Kendi Industrie Du Medicament
Logo	
Date début d'exploitation	21 août 2005
Siège social	6 Cité Bina, commune Rahmania, Douera (16083), wilaya d'Alger
Régime juridique	Secteur privé - SPA (Société par Actions)
Capital	1.991.550.000,00 DA
Activités	Fabrication de compléments alimentaires, fabrication des produits cosmétiques et d'hygiène corporelle, et le conditionnement des produits cosmétiques et d'hygiène corporelle
Directeur générale	Mr. Achi Sofiane
Numéro de téléphone	0770999787
Site Web	https://www.mspharma.com/fr/algerie
Effectifs de l'entreprise	De 1 000 à 4 999 employés

¹ Ibid.

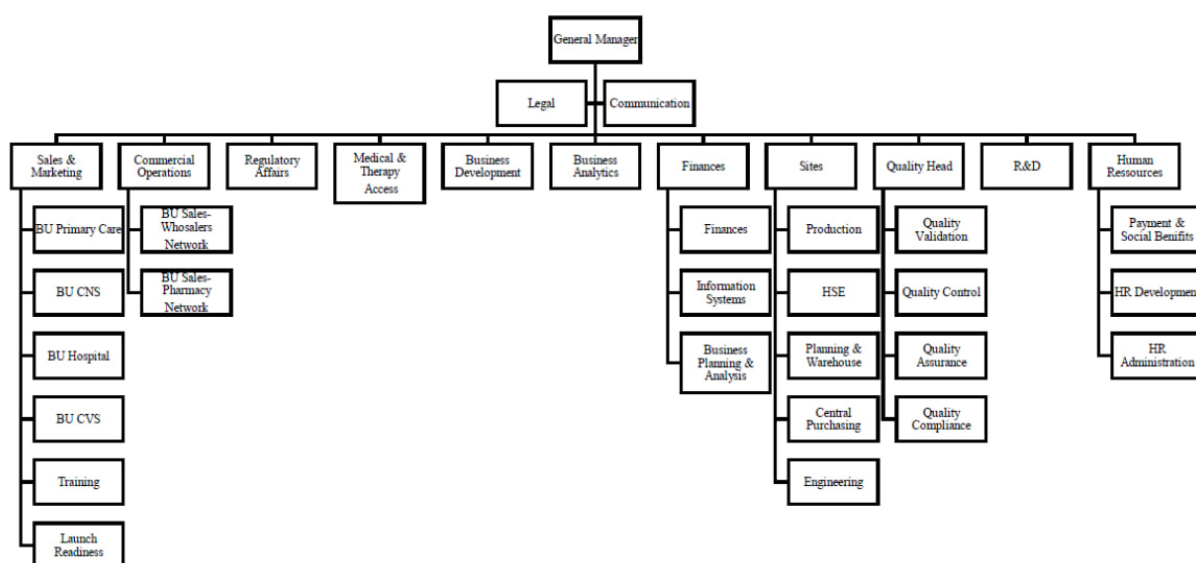
Partenaire stratégique	Astra Pharma (BahrineAstra Pharma)
------------------------	------------------------------------

Source : Tableau élaboré par nos soins à partir des documents internes, Service GRH

1.3.4. Départements d'El Kendi

Dans la figure numéro 29, nous montrons un schéma de la structure organisationnelle de l'entreprise El Kendi.

Figure 29 : L'organigramme de l'entreprise El Kendi



Source : Document interne fourni par le département GRH

Présentons de manière générale les départements de l'entreprise¹ :

- Département Communication : En charge de l'élaboration et de la mise en œuvre de la stratégie de communication d'El Kendi.
- Département Juridique : Responsable de l'approbation des contrats, de la conformité aux lois et du contrôle de leur application.
- Département Commercial :
 - ▶ Service Ventes et Marketing : Stimule la croissance de l'organisation, renforce la présence de la marque et assure la satisfaction et la fidélité des clients à long terme.

¹ Document interne fourni par le département GRH

- ▶ Service Opérations commerciales : Chargé de soutenir l'équipe commerciale et d'optimiser l'efficacité et la rentabilité opérationnelles.
 - ▶ Développement commercial : Assure la réussite à long terme grâce à des initiatives stratégiques et des opportunités innovantes.
 - ▶ Analyse commerciale : Permet à l'organisation de prendre des décisions fondées sur des données, d'optimiser les performances et d'atteindre les objectifs stratégiques.
- Département Affaires réglementaires : Veille à la sécurité, à l'efficacité et à la conformité des produits aux normes réglementaires, protégeant ainsi la santé publique, l'accès au marché et la réputation de l'entreprise.
 - Département Accès au marché / Accès aux soins : Soutient l'engagement de l'entreprise en faveur de soins centrés sur les employés.
 - Département Financier : Responsable de l'élaboration des politiques et des stratégies financières. Il évalue leur mise en œuvre et garantit la qualité des informations financières.
 - Département Industriel / Production (notre stage a été effectué principalement au sein de ce département) :
 - ▶ Sites : Veillent à l'atteinte des objectifs de production, de sécurité, de planification, d'achats et d'ingénierie.
 - ▶ Responsable qualité : Intègre les efforts d'assurance qualité, de validation, de contrôle et de conformité pour garantir la fabrication de produits sûrs, efficaces et de haute qualité.
 - Département Recherche et Développement (R&D) : Responsable de la promotion et de l'exécution de la stratégie de recherche appliquée et de développement technologique au sein des principales activités de l'entreprise.
 - Département Ressources humaines : Gère efficacement le capital humain en attirant, développant et fidélisant les talents.

1.4. La fonction de production au sein de l'entreprise El Kendi

La fonction production est considérée comme une fonction stratégique chez El Kendi. La qualité des produits dépend essentiellement de la qualité du processus de production.

1.4.1. La stratégie de production

El Kendi est un acteur majeur de l'industrie pharmaceutique en Algérie depuis plus de 17 ans. L'entreprise s'est distinguée en offrant plus de 270 produits couvrant de nombreuses aires thérapeutiques¹.

La SPA El Kendi a compris l'importance du digital dans l'optimisation du processus de production. Elle a donc investi massivement dans la digitalisation, dans le but de s'adapter aux changements, de proposer des solutions innovantes aux entreprises souhaitant optimiser leur production et réduire les coûts, ce qui permet de proposer un meilleur rapport qualité/prix sur le marché.

Aujourd'hui, El Kendi est un véritable succès grâce à une stratégie éclairée et intelligente. Elle a su s'imposer comme l'un des leaders du marché national et international, notamment dans la région MENA.

Grâce à des partenariats technologiques avec des pays étrangers tels que l'Allemagne, l'Italie, la Suisse, les États-Unis et même le Japon, l'entreprise bénéficie d'un transfert de technologies et de savoir-faire².

Les médicaments de l'entreprise El Kendi sont des produits fabriqués par des Algériens, intégrant des technologies, un savoir-faire et des normes internationales.

En effet, la qualité et la sécurité sont au cœur de la réflexion stratégique. Au sein du laboratoire de recherche et développement, des tests sont effectués quotidiennement grâce à un matériel très sophistiqué, dans le but de fournir des produits conformes aux normes internationales.

¹ Bessaïah, M. (2025, 27 janvier). *El Kendi, renforce et diversifie ses capacités de production avec la nouvelle unité de fabrication de produits pharmaceutiques d'oncologie en Algérie*. Interfil Algérie. Consulté le 27 mai 2025, sur <https://www.interfilalgerie.com/el-kendi-renforce-et-diversifie-ses-capacites-de-production-avec-la-nouvelle-unite-de-fabrication-de-produits-pharmaceutiques-doncologie-en-algerie/>

² Ms Pharma, 2022, op. cit., p. 17.

L'entreprise veille à garantir que ses processus industriels soient conformes aux bonnes pratiques de fabrication, en passant avec succès des audits et en documentant chaque étape de la production¹.

1.4.2. Les objectifs de l'activité productive

Nous pouvons distinguer trois types d'objectifs dans ce contexte, qui sont² :

1.4.2.1. Objectif en termes de quantités produites

L'objectif de l'entreprise est d'augmenter la quantité de biens ou de produits fabriqués pour répondre à une demande croissante sur le marché. Elle cherche à accroître sa capacité de production en augmentant la cadence, en ajoutant de nouvelles lignes de production et en améliorant les processus existants, afin d'augmenter le volume global. C'est le cas cette année, avec l'inauguration d'une nouvelle unité de fabrication de produits pharmaceutiques dédiée aux traitements oncologiques.

1.4.2.2. Objectif en termes de qualité

En offrant des produits de haute qualité, l'entreprise vise à fidéliser sa clientèle, à obtenir de bonnes recommandations et à maintenir une réputation positive sur le marché.

Elle cherche constamment à améliorer la qualité de ses produits et de ses processus. Elle met en place des systèmes de gestion de la qualité, tels que l'ISO 9001, et adopte des méthodes de prévention telles que le Kaizen, les 5S, l'AMDEC, ainsi que des méthodes d'amélioration continue comme le *Lean Manufacturing*, Six Sigma, le PDCA, le JAT, et ses techniques associées (Kanban, SMED, etc.), afin d'identifier et de résoudre les problèmes, d'optimiser les processus et d'augmenter l'efficacité globale.

1.4.2.3. Objectif en termes de coûts

L'objectif de l'entreprise est de maximiser le chiffre d'affaires global en augmentant les revenus et en réduisant les coûts. Cela peut impliquer une combinaison de stratégies telles que

¹ Bessaïah, op. cit.

² MS PHARMA. (s. d.), op. cit.

l'augmentation des prix de vente, l'identification de nouveaux marchés ou de segments plus rentables, ou encore la recherche de synergies et d'efficacités à tous les niveaux de l'entreprise.

L'entreprise cherche également à réduire les coûts liés à la production de ses biens ou services. Cela peut se faire en optimisant les processus de fabrication, en améliorant l'efficacité énergétique, en réduisant les déchets et les rebuts, en automatisant certaines tâches, et en négociant de meilleurs tarifs avec ses fournisseurs stratégiques.

Dans le tableau numéro 13, nous évoquons les différentes forces et faiblesses de la fonction de production.

Tableau 13 : Les forces et les faiblesses de la fonction de production

Faiblesses	Forces
<ul style="list-style-type: none"> • Manque de moyens financiers (charrette budgétaire) • Main-d'œuvre non qualifiée et non formée au digital • Manque de ressources internes pour piloter la transformation • Manque d'initiative et de contribution des collaborateurs • Difficulté liée au changement culturel et organisationnel 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité à respecter les normes de qualité et de sécurité • Conformité aux réglementations en vigueur • Réactivité en cas de problème • Répartition efficace des stocks dans les entrepôts • Augmentation de la productivité • Automatisation des lignes de production • Investissement dans de nouvelles machines • Bon suivi des commandes clients • Respect des dates de livraison • Diversification des produits • Maîtrise des coûts de production • Bonne logistique • Savoir-faire technique • Produits de haute qualité

Source : Tableau élaboré par nos soins d'après les informations fournies par l'entreprise, service Méthodes et Ingénierie

1.4.3. Formes de numérisation au sein de la fonction de production

La numérisation chez El Kendi est un aspect très riche et important, auquel l'entreprise accorde une grande priorité.

Chez El Kendi, notamment dans le département de production, plusieurs logiciels sont utilisés. Parmi eux, nous pouvons citer¹ :

1.4.3.1. Les logiciels utilisés

- Logiciel de gestion des ressources : il s'agit d'un logiciel de gestion des ressources (souvent appelé ERP – Enterprise Resource Planning), un outil informatique qui permet de planifier, suivre et optimiser l'utilisation des ressources de l'entreprise.

Ce logiciel permet la gestion de :

- ▶ les matières premières (stock, approvisionnement) ;
- ▶ les machines (maintenance, disponibilité) ;
- ▶ le personnel (planning, compétences) ;
- ▶ la production (ordres de fabrication, suivi en temps réel) ;
- ▶ la logistique (réception, expédition, traçabilité).

- Logiciel de gestion de la documentation et de la qualité : il s'agit d'un logiciel de gestion documentaire et de qualité (souvent appelé QMS – Quality Management System), un outil dédié à la maîtrise de la qualité dans l'entreprise, notamment en ce qui concerne les documents normatifs, les procédures, les audits et les non-conformités.

Ce logiciel permet de :

- ▶ gérer les documents qualité (procédures, instructions, modes opératoires) ;
- ▶ assurer la traçabilité des modifications ;
- ▶ planifier et suivre les audits internes/externes ;
- ▶ enregistrer et traiter les non-conformités ;
- ▶ piloter les actions correctives et préventives (CAPA) ;
- ▶ suivre les formations du personnel sur les procédures.

¹ Données fournies par le Manufacturing Manager

1.4.3.2. L'Internet des objets (IoT)

L'analyse des systèmes de production actuellement en place dans l'entreprise révèle qu'elle se situe dans une phase dite pré-IoT ou, tout au plus, partiellement intégrée à une dynamique IoT.

En effet, au sein de l'usine de fabrication des médicaments, la majorité des machines industrielles sont reliées à des interfaces homme-machine (HMI), chacune disposant de sa propre interface dédiée. Le pilotage de ces équipements est réalisé localement, directement via ces interfaces¹.

Ces dispositifs permettent aux machines de fournir des informations en temps réel sur leur état de fonctionnement, de signaler les anomalies au moyen d'alarmes visuelles ou sonores, et de visualiser des simulations 3D représentant les processus en cours. Cependant, les données générées restent stockées localement dans la mémoire des machines, généralement en fonction d'événements spécifiques et sur des durées prédéfinies. Elles ne sont pas transmises vers un réseau centralisé ou externe, ce qui limite l'exploitation globale des données².

Dans le tableau numéro 14, nous évoquons les forces et faiblesses de ces interfaces.

Tableau 14 : Tableau exploratoire des forces et faiblesses des HMI

Forces (Avantages)	Faiblesses (Limites)

Source : Tableau élaboré par nos soins d'après les informations fournies par l'entreprise, service maintenance

¹ Données fournies par le Manufacturing Manager

² Données fournies par le Manufacturing Manager

Pour mieux différencier un système IoT complet de l'utilisation actuelle des HMI, nous avons élaboré le tableau numéro 15.

Tableau 15 : Tableau comparatif entre l'IoT et les HMI

Critère	HMI (Interface Homme-Machine)	IoT (Internet des Objets)

Source : Tableau élaboré par nos soins d'après les informations fournies par l'entreprise, service maintenance

Par conséquent, bien que l'entreprise ne dispose pas encore d'une infrastructure IoT complète, elle est équipée de systèmes technologiquement avancés, constituant une base favorable à une intégration progressive dans une architecture IoT plus développée à l'avenir.

Section 2 : Revue de la littérature et travaux connexes

Dans cette section, nous présenterons un ensemble de recherches issues de la littérature, portant sur l'intégration de la technologie de l'Internet des objets (IoT) dans les usines intelligentes. Nous évoquerons également des travaux de référence sur les technologies Machine to Machine (M2M), l'Internet des objets et les capteurs intelligents.

2.1. Sécurité et fiabilité dans l'IIoT industriel

- Ben Saied et al.¹ ont proposé une méthode pour permettre à deux appareils de partager une clé secrète commune (appelée clé symétrique) afin de sécuriser leurs échanges de données. Cette méthode s'applique à des appareils très simples, utilisés dans l'IIoT, qui ne peuvent pas effectuer des calculs complexes. Ces appareils sont appelés dispositifs M2M contraints (M2M = Machine to Machine ; ici, "contraints" signifie qu'ils ont peu de puissance, peu de mémoire ou peu d'énergie).

Puisque ces petits appareils ne peuvent pas exécuter des opérations cryptographiques trop lourdes (comme celles utilisées dans le chiffrement asymétrique, qui fait intervenir une clé publique et une clé privée), ils délèguent cette tâche à des voisins plus puissants, appelés proxys (ou mandataires). Ces proxys font les opérations compliquées à la place de l'appareil contraint.

Concrètement, l'appareil envoie un secret aléatoire (un nombre choisi au hasard qui servira à créer la clé finale) vers un serveur distant (une sorte de "cerveau central" avec lequel il veut communiquer de manière sécurisée). Ce secret n'est pas envoyé en une seule fois, mais est divisé en plusieurs morceaux, chacun envoyé à un proxy différent. Chaque morceau est chiffré (codé de manière à ne pas être lisible) à l'aide d'une clé pré-partagée (clé que l'appareil et le proxy connaissent déjà à l'avance).

Ensuite, chaque proxy utilise une paire de clés éphémères (des clés temporaires utilisées pour une courte durée), qui lui ont été attribuées par une autorité de confiance appelée un Tiers de Confiance (TTP). Grâce à ces clés, les proxys peuvent transmettre les morceaux du secret de manière sécurisée au serveur. De son côté, le serveur fait le même type d'envoi dans l'autre sens.

Une fois tous les morceaux échangés, l'appareil contraint et le serveur peuvent reconstituer la clé symétrique, qu'ils utiliseront ensuite pour sécuriser toutes leurs communications.

¹ BOUCHAREB, A. (2023). *Développement d'une architecture flexible pour la gestion et la sécurité des transactions et flux de données pour les objets connectés dans le contexte de la maison intelligente* (Mémoire de maîtrise, Université de Québec).

Cependant, ce système présente deux inconvénients :

1. L'appareil contraint doit gérer beaucoup de clés, ce qui est compliqué pour lui.
 2. Il faut faire entièrement confiance aux proxys. Si ces proxys décident de tricher et de collaborer entre eux, ils pourraient reconstruire la clé secrète et espionner les communications.
- Bpifrance¹ présente un panorama d'applications concrètes de l'IoT dans les entreprises françaises, mettant en lumière comment cette technologie transforme divers secteurs en leviers d'efficacité, de résilience et de durabilité. Les capteurs intelligents y sont utilisés pour capter, analyser et transmettre des données en temps réel, souvent couplés à des algorithmes prédictifs ou à des jumeaux numériques.

Des dispositifs connectés, parfois très simples, comme des bracelets ou des capteurs de température, jusqu'à des plateformes complexes (comme EcoStruxure de Schneider Electric), assurent une gestion fine et automatisée des ressources. Dans le secteur industriel, par exemple, Michelin déploie l'IoT pour anticiper l'usure des pneus, tandis que Stellantis l'utilise pour optimiser la chaîne d'approvisionnement grâce au RFID.

Ces systèmes, comme chez Ben Saied, reposent sur une logique d'optimisation par la décentralisation des traitements (capteurs autonomes, edge computing), mais posent aussi la question cruciale de la cybersécurité. Tout comme les « proxys » chez Ben Saied, les dispositifs connectés doivent être fiables pour éviter toute compromission des données ou des infrastructures critiques. Si l'IoT promet efficacité et anticipation, il reste tributaire d'un écosystème technique et humain digne de confiance.

Le rapport met également en évidence deux limites transversales : la dépendance technologique accrue des entreprises aux infrastructures numériques, et la nécessité d'un encadrement éthique et réglementaire strict pour protéger la vie privée et éviter les dérives sécuritaires.

¹ BPIFRANCE. (2021). *IoT et entreprises : vers une industrie connectée et durable*. Rapport de synthèse [rapport en ligne]. Consulté le 1 juin 2025, sur <https://www.bpifrance.fr>

2.2. Contrôle avancé et optimisation des processus

- Nitol Saha et al.¹ ont proposé un système de chambre de stabilité intégrant l'Internet des objets (IoT) pour l'industrie pharmaceutique. Quatre chambres distinctes ont été développées à partir des installations existantes d'une usine, chacune contrôlée via un automate Siemens S7-1200 avec visualisation sur la plateforme WinCC Runtime Advanced, conforme à la norme FDA 21 CFR Part 11. Ce système permet un contrôle précis de la température et de l'humidité via des capteurs et un algorithme PID, tout en assurant un suivi en temps réel grâce à une architecture IoT basée sur MQTT et SNAP7. Une application Python récupère les données des capteurs via le PLC, les transmet à un serveur cloud, et les rend disponibles via une API REST Django. Bien que performant, le système présente des pistes d'amélioration, notamment l'intégration future de l'intelligence artificielle pour la prédiction des pannes et l'amélioration de la précision des capteurs.

- Papathanasiou et al.² ont proposé une méthode intelligente pour mieux contrôler un processus industriel de séparation utilisé dans la chimie ou la pharmacie, appelé chromatographie. Ce processus sert à séparer les composants d'un mélange (par exemple, séparer deux produits chimiques différents) en les faisant passer à travers des colonnes remplies d'un matériau spécial.

Leur méthode s'applique à un système semi-continu (c'est-à-dire qui fonctionne par cycles répétés, mais pas en continu comme une chaîne sans fin), composé de deux colonnes. Pour bien contrôler ce système, ils ont utilisé un cadre appelé PAROC (Parametric Optimization and Control), qui aide à modéliser, optimiser et piloter des processus complexes.

D'abord, ils ont créé un modèle très précis du processus pour en comprendre le comportement, en utilisant des équations différentielles-algébriques partielles (des équations mathématiques complexes qui décrivent comment les variables du système changent dans le temps et dans l'espace). Ensuite, comme ces modèles sont trop compliqués pour être utilisés directement en

¹ Saha, N., Das, S., & Chakraborty, S. (2021). *IoT based stability chamber for pharmaceutical industry using PLC and cloud connectivity*. International Journal of Scientific & Engineering Research, 12(9), 505–512.

² Papathanasiou, M. M., Pistikopoulos, E. N., & Dua, V. (2019). *Multi-parametric model predictive control for a simulated moving bed process*. Computers & Chemical Engineering, 127, 1–14.

temps réel, ils ont créé une version simplifiée du modèle pour pouvoir faire des calculs plus rapidement.

Ils ont ensuite conçu un système de commande appelé contrôleur prédictif multi-paramétrique (mp-MPC). Ce type de contrôleur anticipe l'évolution du système et choisit les meilleures actions à prendre à chaque instant, en fonction de plusieurs paramètres. Il est capable de générer des profils d'entrée périodiques (des réglages cycliques à appliquer au système), qui imitent ceux testés en laboratoire, pour garantir une bonne séparation des composants à chaque cycle.

L'originalité de leur approche réside dans la manière de mesurer la qualité de la séparation. Au lieu de mesurer la pureté des produits uniquement à la fin de chaque cycle, ils surveillent en continu l'intégrale des concentrations des composants à la sortie (c'est-à-dire l'évolution globale des concentrations pendant toute la durée du cycle), ce qui donne un retour d'information plus riche et plus rapide.

Le contrôleur ajuste principalement un paramètre clé : la concentration du modificateur (un produit ajouté pour influencer la séparation). C'est ce paramètre qui a le plus d'impact sur les résultats.

Bien que leur méthode donne de bons résultats en simulation (dans des tests virtuels sur ordinateur), elle demande :

- ▶ une modélisation très précise du système réel,
- ▶ beaucoup de puissance de calcul pour résoudre les équations en temps réel,
- ▶ et des données fiables et en temps réel pour fonctionner correctement dans un environnement industriel.

2.3. Modernisation et automatisation d'équipements industriels

Jovancevic et al.¹ ont développé un système robotisé baptisé Air-Cobot, conçu pour automatiser l'inspection des avions lors des opérations de maintenance. Ce robot collaboratif, incapable à lui seul de gérer toutes les tâches complexes de navigation, s'appuie sur une architecture modulaire combinant capteurs visuels et lasers, intégrés à une plateforme mobile autonome. Air-Cobot évolue dans un environnement aéroportuaire dynamique, où il délègue certaines

¹ Jovancevic, A., Pinguet, J., Viala, P., & Deremetz, M. (2017). *Air-Cobot, a collaborative mobile robot for aircraft inspection*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 127–136.

tâches de traitement, comme l'identification de défauts ou la recalibration de position, à des algorithmes spécialisés embarqués sur ses modules Linux (navigation) et Windows (inspection).

Le système repose sur une coopération étroite avec l'opérateur humain, qui joue le rôle de garant de la validation finale. Pour localiser un avion dont la position exacte est inconnue, le robot emploie des techniques de recalage de nuages de points et de reconnaissance d'amers visuels. Grâce à cela, il peut estimer sa position relative par rapport à l'aéronef. L'inspection proprement dite est ensuite réalisée via des capteurs de vision ou de scan 3D, avec analyse comparative des données acquises face au modèle CAO de l'avion.

Deux limites principales émergent néanmoins de ce schéma : d'une part, la nécessité pour le robot d'exécuter en temps réel une batterie d'algorithmes gourmands en calculs, ce qui impose une gestion fine des ressources matérielles. D'autre part, la dépendance à la fiabilité des capteurs et à la qualité des modèles initiaux rend le système sensible à la complexité de l'environnement extérieur. En somme, malgré son autonomie proclamée, Air-Cobot reste un « cobot » au sens noble du terme : un assistant intelligent, mais encore tributaire de la main humaine pour le jugement final.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'ancrer notre étude dans un cadre organisationnel et conceptuel solide. La présentation de l'entreprise El Kendi, filiale du groupe MS Pharma, a mis en lumière l'importance stratégique de la fonction production dans un environnement pharmaceutique soumis à de fortes exigences de qualité, de traçabilité et d'efficacité. Cette contextualisation est essentielle pour comprendre les motivations et les enjeux de la transformation numérique en cours.

La revue de littérature qui a suivi nous a offert un panorama des avancées technologiques autour de l'Internet des objets (IoT)

Chapitre 4

*Méthodologie de la recherche et analyse
des résultats*

Introduction

Le but de ce chapitre est de mettre en lumière la méthodologie utilisée dans notre recherche, les outils, la démarche globale, puis d'exposer les données récoltées et de les analyser.

Section 1 : Méthodologie de la recherche

Dans cette section, nous commencerons par définir quelques termes clés tels que l'enquête, les types d'enquêtes, l'entretien et ses différentes formes. Ensuite, nous présenterons l'objectif de notre recherche, la méthodologie adoptée, l'outil utilisé, l'échantillon retenu, ainsi que le déroulement de notre entretien.

1.1. Référentiel méthodologique de l'étude

Le cadre méthodologique de la recherche constitue un élément central de notre étude. Il fournit une structure organisée qui précise la méthode utilisée, identifie les variables en jeu, délimite le périmètre de l'analyse et décrit le déroulement global de la démarche.

1.1.1. Définitions terminologiques

Avant de détailler le déroulement de notre étude, il convient de définir un certain nombre de termes clés afin d'en clarifier le sens et d'assurer une compréhension commune.

1.1.1.1. L'enquête

Selon Daniel¹, l'enquête est définie comme « *une méthode de recherche de plus en plus utilisée dans les études concernant les produits et les marques. Parmi les méthodes de l'enquête, on distingue : les entretiens individuels et les réunions de groupe* ».

1.1.1.2. L'enquête qualitative

Paul² décrit l'enquête qualitative comme suit : « *Les études qualitatives sont des études à caractère intensif, utilisant, au niveau de la récolte des données, une approche relativement ouverte, non directive, permissive et indirecte des personnes interrogées. Ces études se caractérisent également par un nombre réduit de contacts, ainsi qu'un mode particulier de sélection des répondants et d'interprétation des données* ».

¹ Caumont, D. (1988). *Les études de marché* (éd. Dunod). Paris. p. 45.

² PELLEMANS, P. (1999). *Recherche qualitative en marketing*. De Boeck Université. Paris, p. 16.

1.1.1.3. L'entretien

Selon Hassane et Smail¹, un entretien également appelé interview ou entrevue, est défini comme « *un rapport oral, en tête-à-tête, entre deux personnes, dont l'une transmet à l'autre des informations sur un sujet prédéterminé* ».

1.1.1.4. Les types d'entretiens

Il existe principalement trois types d'entretiens² :

- L'entretien directif : également appelé entretien standardisé, il se situe à mi-chemin entre l'étude qualitative et l'étude quantitative. Dans cette méthode, le chercheur guide strictement l'échange en posant des questions fermées ou à réponses courtes, généralement préétablies dans un questionnaire.
- L'entretien non directif : appelé aussi entretien libre, il se distingue par l'absence de structure formelle et de grille de questions prédéfinies. L'intervieweur propose simplement un thème général et adopte une posture d'écoute active, en intervenant de manière minimale pour relancer ou encourager l'expression spontanée de la personne interrogée.
- L'entretien semi-directif : il représente une forme intermédiaire entre les deux précédents. Le chercheur s'appuie sur une trame souple de questions ouvertes, tout en laissant une certaine liberté d'expression à l'interviewé, qui peut organiser ses réponses selon sa propre logique.

1.2. L'objectif de la recherche

L'objectif principal visé par cette recherche est de répondre à notre problématique à savoir : « *De quelle manière l'exploitation actuelle de l'Internet des objets au sein de l'entreprise El Kendi contribue-t-elle à l'optimisation de son processus de production, et quelles perspectives*

¹ Chabani, S., & Ouacherine, H. (2019). *Guide de méthodologie de la recherche en sciences sociales* (2e éd.). Alger.

² Hennous, I. (2023). *L'intégration digitale dans le processus de production* (Mémoire de master, EHEC, Tipaza).

d'innovation sont-elles envisagées dans ce cadre ? ». La réponse à notre problématique de départ repose sur l'atteinte de ces objectifs :

- comprendre comment l'Internet des Objets est actuellement intégré dans les processus de production de l'entreprise El Kendi ;
- identifier les obstacles et les limitations rencontrés par l'entreprise dans l'usage opérationnel de cette technologie ;
- explorer les opportunités d'innovation et d'optimisation rendues possibles par l'Internet des Objets dans le contexte industriel spécifique d'El Kendi.

1.3. La réalisation de l'étude

Pour mener à bien toute recherche scientifique, il est indispensable d'utiliser des méthodes et des techniques garantissant des résultats fiables.

Dans notre cas, afin d'atteindre nos objectifs, nous avons jugé nécessaire de réaliser une étude qualitative sur le terrain, en sélectionnant les questions en fonction de notre thème, de nos objectifs et de la situation réelle actuellement observée dans l'entreprise.

Dans ce qui suit, nous présenterons la structure de notre guide d'entretien ainsi que l'échantillon retenu pour notre enquête.

1.3.1. Méthode d'étude

Dans le cadre de notre étude actuelle, nous avons opté pour une approche qualitative et adopté une méthode déductive comme point de départ de notre recherche exploratoire sur l'intégration de l'Internet des objets (IoT) dans les processus industriels de production.

La démarche qualitative nous aide à explorer de manière approfondie les pratiques opérationnelles ainsi que les effets tangibles de la transition numérique au sein de l'entreprise. En particulier, elle se révèle précieuse pour étudier des phénomènes complexes, comme l'adoption de nouvelles technologies dans un contexte donné.

En choisissant une approche déductive plus pratique, et en nous basant sur des situations concrètes et des observations de terrain, sans formuler de hypothèses préalables, le but est

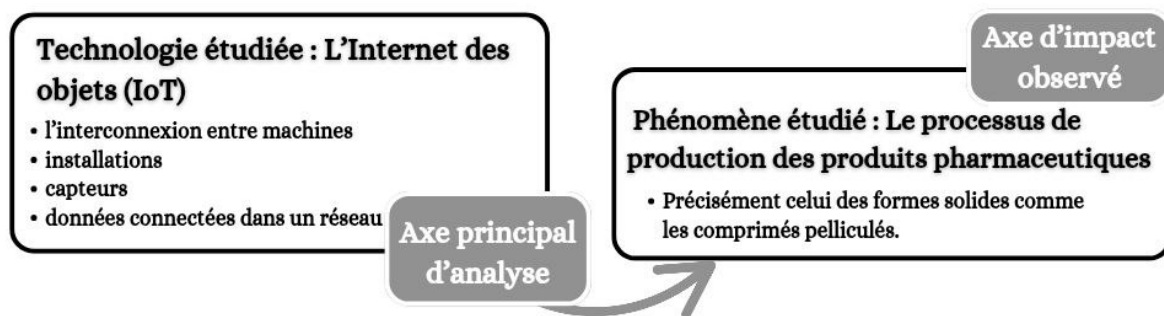
d'analyser les données collectées afin d'en déduire les implications réelles de l'IoT dans les processus de production.

Nous cherchons à garantir une analyse complète et bien située dans le contexte de l'entreprise étudiée grâce à ce cadre méthodologique.

1.3.2. Cadre d'analyse thématique

Dans le cadre de notre étude qualitative, nous avons identifié deux axes principaux d'analyse, illustrés dans la figure 30.

Figure 30 : Axes principaux d'analyse



Source : Élaboré par nos soins

1.3.3. Moyen d'étude

Dans le cadre de notre approche qualitative, spécifique à notre étude actuelle, nous avons choisi de mener des entretiens semi-directifs, une méthode qui est largement reconnue pour sa capacité à investiguer en détail les opinions, les vécus et les pratiques dans le domaine professionnel. Ce genre d'entretien offre une certaine latitude dans la formulation des questions, tout en préservant une organisation thématique qui favorise la comparaison des réponses.

Nous avons interviewé quatre personnes impliquées dans le processus de production et la numérisation au sein de l'entreprise :

- trois rencontres ont eu lieu en personne, dans les locaux de la société, afin d'observer directement le cadre de travail ;

- une entrevue écrite a été réalisée, la personne interrogée ayant répondu par e-mail aux questions de l'intervieweur.

1.3.4. L'échantillonnage

Le choix de ces personnes a été effectué en fonction de leur expérience¹, de leur implication dans la digitalisation et de leur rôle au sein du processus de production.

Le tableau numéro 16 présente nos interviewés, leur fonction, ainsi que la durée d'occupation de leur poste actuel.

Tableau 16 : Profils des interviewés

Code	Fonction	Ancienneté dans le poste	Lien avec la digitalisation / technologie IoT
I1	Responsable de la production	Plus de 2 ans	Utilisation directe des interfaces homme-machine (IHM) dans les lignes de production
I2	Responsable des systèmes d'information	8 ans	Intervient en cas de panne avec le service maintenance pour les systèmes connectés
I3	Chef de section ingénierie	Plus de 4 ans	Sollicité lors de pannes ou anomalies liées au fonctionnement des IHM
I4	Chef de service contrôle qualité	3 ans	Chargé de l'archivage numérique des résultats de production

Source : Élaboré par nos soins

1.3.5. Le protocole de guide d'entretien

Afin de mener efficacement notre enquête qualitative et d'en faciliter la conduite, nous avons élaboré un guide d'entretien structuré autour de neuf thématiques principales. Chaque thématique comprend une série de questions, pour un total de 22 questions (voir Annexe 01).

¹ Veuillez noter que l'ancienneté indiquée concerne uniquement le poste actuellement occupé.

Ces entretiens ont été conduits de manière semi-directive : les participants n'étaient pas tenus de répondre strictement question par question, mais étaient invités à s'exprimer librement autour des thèmes abordés.

Cette approche permet de recueillir des informations plus riches et nuancées, y compris sur des éléments qui ne sont pas nécessairement couverts par les questions initialement prévues dans le guide.

Dans le tableau numéro 17, nous présentons les différents thèmes de notre guide d'entretien ainsi que les objectifs spécifiques associés à chaque section thématique.

Tableau 17 : Description des thèmes du guide d'entretien et leurs objectifs

Thèmes	Objectif
Thème 1 : Présentation du personnel interviewé	Avoir un aperçu du profil des interviewés : ancienneté, poste occupé, missions principales.
<ul style="list-style-type: none"> • Thème 2 : Technologies utilisées par l'entreprise • Thème 3 : Informations sur l'Internet des objets (IoT) 	Comprendre les technologies avancées existantes dans l'entreprise, en particulier l'intégration actuelle ou non de l'IoT.
<ul style="list-style-type: none"> • Thème 4 : Utilisation des HMI • Thème 5 : Interaction homme-machine • Thème 6 : Cas d'anomalie • Thème 7 : Impact de l'utilisation des HMI 	Étudier le fonctionnement des interfaces homme-machine, leur facilité d'utilisation, la gestion des anomalies, et les bénéfices apportés par ces HMI.
Thème 8 : Niveau de maturité numérique	Évaluer la perception des interviewés sur le niveau de digitalisation de l'entreprise et les limites actuelles des HMI utilisées.
Thème 9 : Perspectives d'évolution	Identifier les projets en cours liés à l'industrie 4.0 et recueillir la vision des interviewés sur l'avenir technologique de l'entreprise.

Source : élaboré par nos soins

Dans le tableau 18, nous présentons le déroulement des entretiens en indiquant la date, le nom et prénom des interviewés, la durée des entretiens ainsi que leur qualité. Ces informations permettent de mieux comprendre l'analyse des résultats exposée dans la section suivante.

Tableau 18 : Deuxième partie du profil des interviewés – déroulement des entretiens

Interviewés	Qualité	Durée	Date
Maamri Yacine	Responsable de production	-	12 mai 2025
Elsaidaoui Bassel	Responsable informatique	20 minutes	25 mai 2025
Benkara Mustapha Mohammed	Chef de section ingénierie	40 minutes	26 mai 2025
Faci Ilham	Chef de section contrôle qualité	25 minutes	27 mai 2025

Source : élaboré par nos soins

Section 2 : Présentation et analyse des résultats

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de notre étude, analyser les données obtenues, formuler des suggestions et des recommandations, ainsi qu'exposer le projet que nous souhaitons mettre en œuvre au sein de l'entreprise El Kendi.

2.1. Analyse des résultats de l'enquête

Selon Bruce et Howard¹, l'analyse des données « *permet de donner du sens aux informations recueillies lors de la phase de collecte. Elle consiste à transformer les informations en données exploitables* ».

Pour examiner les données de manière approfondie et tirer des conclusions utiles pour notre recherche, nous avons choisi une approche par synthèse. Cela signifie que nous allons résumer chaque réponse, extraire les éléments pertinents, puis approfondir l'analyse des résultats afin d'en tirer des enseignements.

2.1.1. Résumé des réponses obtenues

- Elsaidaoui Bassel, *IT Manager*, occupe ce poste depuis 8 ans :
M. Bassel occupe le poste de responsable informatique chez El Kendi. Il supervise plusieurs équipes spécialisées dans des domaines tels que la cybersécurité, les opérations et les systèmes

¹ Berg, B. L., & Lune, H. (2013). *Qualitative research methods for the social sciences* (Global ed., p. 66). England: Pearson.

d'exploitation. Son rôle est essentiel pour assurer la continuité des activités de l'entreprise tout en répondant aux besoins métiers.

L'entreprise utilise des technologies avancées telles que le cloud, des applications de virtualisation, ainsi que des firewalls performants, en suivant les dernières tendances en matière de cybersécurité. Pour la gestion du flux informationnel, des systèmes de messagerie sont utilisés.

Concernant l'Internet des objets (IoT), il précise que ce concept fait référence à l'utilisation de capteurs installés sur les machines pour collecter divers types de données, comme des images. Toutefois, El Kendi ne l'emploie pas encore à ce jour.

Les interfaces homme-machine (HMI) sont jugées conviviales et faciles à utiliser, un critère important pour leur adoption par les utilisateurs. Le service IT n'intervient pas directement dans leur utilisation opérationnelle, mais joue un rôle dans la gestion administrative (droits d'accès, mots de passe, etc.).

Les données collectées sont archivées localement sur les machines, qui disposent chacune de leur propre système. Le service IT intervient pour restaurer ces systèmes en cas de panne. Les données sont traitées mensuellement, et seuls les services production et contrôle qualité y ont accès.

En cas d'anomalie, une collaboration avec le service de maintenance est parfois nécessaire. Les pannes peuvent être corrigées rapidement, généralement en moins d'une heure.

Selon M. Bassel, les HMI actuelles présentent des limites : elles ne permettent pas de faire de prévisions ni de transmettre automatiquement les données de productivité. Il envisage, pour le futur, l'intégration de capteurs connectés pour surveiller la consommation de ressources telles que le gaz, l'électricité et l'eau.

- Maamri Yacine, *Manufacturing Manager*, occupe ce poste depuis plus de 2 ans :

M. Maamri Yacine occupe le poste de responsable de la production chez El Kendi. Ses principales missions incluent la planification et l'organisation de la production, la gestion des équipes, le suivi du respect des Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF) ainsi que des normes et procédures qualité internes. Il est également impliqué dans la gestion des ressources matérielles

et des équipements, l'amélioration continue, l'innovation et le pilotage de la performance globale du service production.

En ce qui concerne les technologies avancées, l'entreprise utilise :

- ▶ des équipements pilotés via des interfaces HMI, intégrant différents capteurs ;
- ▶ des instruments de mesure pour les paramètres environnementaux ;
- ▶ un logiciel de gestion des ressources ;
- ▶ un logiciel de gestion documentaire et qualité.

Les outils informatiques utilisés pour la gestion des flux informationnels comprennent des logiciels connectés via le cloud, Outlook pour la messagerie, ainsi que d'autres logiciels spécialisés.

M. Maamri perçoit l'IoT comme une véritable valeur ajoutée en matière de contrôle, de traçabilité et d'analyse de données en temps réel. Les interfaces HMI sont des outils essentiels au pilotage des machines : les techniciens reçoivent une formation spécifique suivie d'une évaluation, afin d'assurer leur bon usage en conformité avec le manuel du fabricant et les procédures internes.

Les données collectées via les HMI comprennent : les paramètres appliqués, les identifiants des utilisateurs, les dates/heures d'utilisation, les alarmes et arrêts éventuels. Seul le manager qualité est autorisé à consulter ces données.

En cas de panne, un arrêt de production est inévitable. Une demande d'intervention est envoyée au département de maintenance. La durée de réparation dépend de la nature de la panne. Il cite l'exemple de la maintenance prédictive, basée sur le nombre d'heures d'exploitation, permettant d'éviter des arrêts soudains et leurs conséquences financières.

Les HMI permettent une traçabilité complète du processus de fabrication (avant, pendant, après), facilitent le suivi en temps réel, l'analyse des performances et la prise de décision proactive. M. Maamri ne perçoit pas de limites dans l'utilisation de ces interfaces, son rôle étant surtout technique.

Enfin, il évoque un projet de digitalisation en cours : aujourd'hui, chaque machine dispose d'un log book papier dans lequel les opérateurs documentent manuellement les activités. L'objectif est d'installer des tablettes numériques connectées aux machines, permettant une saisie

automatique des données, qui seront ensuite stockées sur un réseau collaboratif, réduisant ainsi la charge documentaire manuelle et améliorant la traçabilité.

- Benkara Mustapha Mohammed, *Engineering section head*, occupe ce poste depuis plus de 4 ans :

M. Benkara est responsable de l'exécution des plans de maintenance au sein de l'entreprise El Kendi. Ses deux principales missions sont :

- ▶ l'exécution de la maintenance préventive ;
- ▶ et la réduction des interventions curatives.

Il collabore avec d'autres départements comme la R&D ou l'analytique pour établir les plans de maintenance. Cependant, l'exécution de ces plans reste partielle, atteignant environ 70 % de réalisation. Le type et la fréquence de la maintenance préventive dépendent des machines : certaines nécessitent des interventions mensuelles, d'autres trimestrielles (après 1000 à 2000 heures de fonctionnement).

La plupart des équipements de l'entreprise sont modernes et compatibles avec les technologies de l'industrie 4.0, mais les systèmes de connexion et d'intégration ne sont pas encore opérationnels. Ainsi, les données collectées par les machines ne peuvent pas encore être visualisées ou exploitées pleinement.

Pour la gestion des flux informationnels, les outils actuels sont limités :

- ▶ il utilise Excel, qu'il considère comme inadapté pour une entreprise comme El Kendi ;
- ▶ il estime qu'un système basé sur les stratégies GPO (Group Policy Object) serait plus adapté, mais il n'est pas encore en place ;
- ▶ un ERP est utilisé, mais pas pour la maintenance, ce qui l'oblige à entrer manuellement les données (pannes, interventions, etc.).

Les coûts de maintenance (pièces, main d'œuvre, temps d'arrêt) ne sont pas calculés automatiquement, faute d'outils adaptés.

Les machines disposent d'un système de sauvegarde locale des événements (fonctionnements, erreurs, arrêts), conservés pendant 2 semaines à 1 mois. L'équipe qualité (QA) récupère ensuite

ces données pour archivage. En cas de réclamation, la première vérification consiste à analyser si la machine a détecté ou signalé un problème.

Les machines ne disposent pas de détection prédictive automatisée : la nature des pannes est identifiée a posteriori, à partir des données enregistrées.

Les données sont consultées par les superviseurs de l'ingénierie et de la qualité. Les HMI sont présentées sous forme de tablettes faciles à utiliser. L'équipe de maintenance prend en charge la quasi-totalité des réparations, sauf en cas de problèmes spécifiques (ex. textiles). Il souligne que le coût d'un seul HMI peut dépasser un million de dinars.

Il mentionne que chaque machine nécessite son propre modèle d'HMI, ce qui limite l'interopérabilité et ne permet pas de réduire les coûts de stockage.

Enfin, il cite des projets futurs :

- ▶ Intégration d'un GMO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) ;
- ▶ Connexion des équipements à un système centralisé, afin de constituer une base de données fiable pour :
 - optimiser l'utilisation et la durée de vie des équipements ;
 - prévoir les besoins en mises à jour ou remplacements ;
 - et améliorer l'exécution des plans de maintenance préventive.
- Faci Ilham, *QC section head*, occupe ce poste depuis 3 ans :

Mme Faci Ilham occupe le poste de responsable du service contrôle qualité Section Head depuis 3 ans chez El Kendi. Ses principales missions incluent :

- ▶ la gestion du personnel de son département ;
- ▶ la supervision des activités de contrôle qualité (CQ) ;
- ▶ le suivi du travail des analystes, seniors analystes et superviseurs ;
- ▶ la participation aux audits internes et externes ;
- ▶ ainsi que l'assistance lors des inspections de l'Agence Nationale des Produits Pharmaceutiques (ANPP).

Dans le cadre du contrôle qualité, plusieurs techniques analytiques avancées sont employées :

- ▶ HPLC (Chromatographie en phase liquide à haute performance) : pour les analyses quantitatives des principes actifs.
- ▶ GC (Chromatographie en phase gazeuse) : pour la séparation des solvants non analysables par HPLC.
- ▶ Spectroscopie infrarouge (IR) : utilisée pour l'identification de matières premières, excipients, et certains articles de conditionnement.

L'équipe utilise plusieurs outils :

- ▶ Excel pour certaines saisies ;
- ▶ QUMEX, un logiciel de gestion documentaire visant à réduire la paperasse ;
- ▶ ERP – Microsoft Dynamics AX pour la gestion globale.

Elle souligne que l'instabilité de la connexion Internet dans le pays constitue un obstacle à l'intégration complète de l'Internet des Objets (IoT) dans les processus industriels.

Les interfaces homme-machine (HMI) jouent un rôle important dans :

- ▶ la facilitation du processus de libération des produits ;
- ▶ la communication d'informations entre les équipements et les équipes.

Les données récupérées (résultats de dosage, production...) via les HMI sont stockées localement sur les PC connectés aux équipements. Les analystes peuvent ainsi valider certains paramètres. Toutefois, il n'y a pas de suivi en temps réel globalisé.

Un système de data *integrity* est en place. Il permet un accès restreint selon les fonctions des employés : analystes et superviseurs peuvent consulter certaines données, en fonction de leur rôle.

En cas de défaillance du système (HPLC ou HMI), cela entraîne des arrêts périodiques de certaines activités.

Les log books constituent des preuves de conformité aux Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF). Chaque employé y consigne toutes les activités réalisées. À El Kendi, cette

documentation se fait encore de manière manuelle sur papier, bien que certains laboratoires la réalisent déjà via des logiciels.

Mme Faci mentionne un projet de mise à jour des équipements et méthodes afin de :

- ▶ se conformer aux standards internationaux ;
- ▶ combler les écarts (zéro gap) avec les exigences de qualité européennes ;
- ▶ et moderniser les pratiques du département qualité.

2.1.2. Synthèse des entretiens

L'analyse des données nous a permis de synthétiser la situation actuelle chez El Kendi et d'identifier les leviers clés permettant de comprendre et d'évaluer l'exploitation actuelle de l'Internet des objets dans leur processus de production. Où nous avons atteint l'objectif essentiel de notre entretien (voir tableau 18) :

- Comprendre les technologies avancées existantes dans l'entreprise, en particulier l'intégration actuelle ou non de l'IoT ;
- Étudier le fonctionnement des interfaces homme-machine, leur facilité d'utilisation, la gestion des anomalies, et les bénéfices apportés par ces HMI ;
- Évaluer la perception des interviewés sur le niveau de digitalisation de l'entreprise et les limites actuelles des HMI utilisées ;
- Identifier les projets en cours liés à l'industrie 4.0 et recueillir la vision des interviewés sur l'avenir technologique de l'entreprise.

Pour commencer, l'entreprise El Kendi a amorcé une modernisation technologique avec l'utilisation de systèmes informatiques avancés (cloud, virtualisation, firewalls, ERP, logiciels spécialisés). Plusieurs services exploitent des équipements modernes dotés d'interfaces HMI et de capteurs, notamment en production et en contrôle qualité.

Cependant, l'Internet des objets (IoT) n'est pas encore pleinement intégré. Tous les intervenants reconnaissent son potentiel, notamment pour la traçabilité, la surveillance en temps réel et la maintenance prédictive.

Le service IT précise que les capteurs connectés ne sont pas encore installés, bien qu'ils soient envisagés pour surveiller les consommations énergétiques. En qualité, l'instabilité de la connexion Internet est identifiée comme un frein à l'intégration de l'IoT. Le département de maintenance, quant à lui, ne peut pas exploiter les données collectées par les équipements, faute d'interconnexion entre les systèmes.

Les HMI sont omniprésentes dans les processus de production, d'ingénierie et de contrôle qualité. Elles sont généralement conviviales et faciles à utiliser, conçues sous forme de tablettes ou d'écrans tactiles. Leur accessibilité est renforcée par des formations spécifiques dispensées aux opérateurs.

Les bénéfices majeurs identifiés sont :

- suivi en temps réel de la production ;
- traçabilité complète seulement pendant la fabrication ;
- accès aux données opérationnelles (paramètres, utilisateurs, alarmes, etc.) ;
- amélioration de la prise de décision grâce à l'analyse des performances ;
- facilitation de la libération des produits.

En cas d'anomalie, les services maintenance et IT interviennent rapidement (en moins d'une heure en général). Toutefois, la gestion des pannes reste souvent réactive, faute de systèmes prédictifs automatisés.

Les interviewés s'accordent à dire que la digitalisation est en cours mais encore partielle :

- En production et en qualité, des outils numériques existent, mais la documentation reste majoritairement manuelle (log books papier) ;
- En ingénierie, les données sont saisies sur Excel, jugé inadapté. Le système ERP n'est pas encore utilisé pour la maintenance ;
- Les HMI ne sont pas interopérables, chaque machine ayant son propre modèle, ce qui complexifie la gestion et augmente les coûts.

Par ailleurs, les HMI actuelles sont limitées : elles ne transmettent pas automatiquement les données de productivité, n'intègrent pas d'analytique prédictive et ne permettent pas une visualisation centralisée des données. L'accès aux données est cloisonné selon les fonctions (qualité, production, maintenance).

Plusieurs projets liés à l'industrie 4.0 sont en cours de réalisation chez El Kendi :

- Digitalisation des log books en production : passage à des tablettes connectées pour une saisie automatique ;
- Intégration d'un GMO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) pour centraliser les données de maintenance ;
- Connexion des équipements à un système centralisé, avec des objectifs clairs :
 - ▶ Optimiser la durée de vie des équipements,
 - ▶ Prédire les besoins en remplacement ou mise à jour,
 - ▶ Améliorer l'efficacité des plans de maintenance ;
 - ▶ Mise à jour des équipements en qualité pour atteindre les normes internationales et se conformer aux standards européens ;
 - ▶ Installation future de capteurs connectés pour surveiller les consommations d'énergie.

El Kendi est engagée dans une transition vers l'industrie 4.0, avec une base technologique solide et des ambitions claires. Toutefois, l'intégration effective des technologies avancées, notamment l'IoT et les HMI intelligentes, reste partielle.

2.2. Suggestions et recommandations

À la lumière des résultats de notre étude sur le positionnement de l'Internet des objets dans les processus de production des produits pharmaceutiques, nous avons soulevé la majorité des insuffisances concernant ce contexte. Pour éliminer ces insuffisances, il est nécessaire d'intégrer cette technologie avancée de manière plus correcte et utile. Pour cela, nous avons élaboré les recommandations suivantes :

- Installation des capteurs IoT sur les machines industrielles pour collecter automatiquement des données en temps réel.
- Connecter ces capteurs à un réseau centrale pour suivre les informations en temps réel et recevoir des alertes en cas de problème.
- Utiliser un réseau sécurisé pour éviter les soucis liés à l'Internet.
- Standardiser les interfaces homme-machine (HMI) en choisissant un protocole commun.

- Intégration d'un système SCADA ou MES pour regrouper toutes les données et mieux superviser les opérations.
- Privilégier les HMI avec des fonctionnalités avancées comme l'analyse intelligente, les alertes automatiques et la connexion au cloud.
- Numériser les log books avec des tablettes sécurisées, intégrant signature électronique des opérateurs concernés.
- Remplacer le papier par une GED (Gestion électronique des documents) connectée au logiciel qualité pour chaque département de l'entreprise.
- Assurer la conformité des données, l'élément le plus important dans l'industrie pharmaceutique.
- Utiliser un logiciel de gestion de maintenance (GMAO) pour : planifier la maintenance préventive ; suivre les interventions en direct ; calculer les coûts réels de maintenance.
- Connecter la GMAO à l'ERP pour une vue globale sur l'impact de la maintenance sur la production.
- Créer une feuille de route Industrie 4.0 avec des étapes précises et des responsables désignés.
- Former un comité digital avec des experts IT, maintenance, qualité et production pour coordonner les projets.
- Cartographier les données pour savoir quelles informations sont disponibles, lesquelles sont essentielles et comment les exploiter.
- Déployer un intranet industriel robuste pour échanger les données sans dépendre d'Internet.
- Utiliser un cloud hybride pour sécuriser les données critiques sur site tout en les synchronisant avec le cloud.
- Former les équipes aux outils numériques (ERP, GMAO, GED, IoT).
- Organiser des ateliers avec les utilisateurs pour faciliter l'adoption des nouvelles technologies.

2.3. Capteurs IoT en production

Le projet que nous avons souhaité mettre en œuvre au sein de l'usine de production de médicaments El kendi avait pour objectif d'améliorer la traçabilité des lignes de production, de réduire les pertes de temps et d'optimiser la qualité des produits. L'axe principal du projet portait sur la traçabilité en temps réel de la production.

Dans le cadre du processus de fabrication, nous avons choisi d'étudier un médicament sous forme de comprimé pelliculé. Après la fabrication du comprimé, la production passe à la phase de conditionnement, qui se divise en deux étapes :

- Premier conditionnement : il s'agit de la mise en blister des comprimés, c'est-à-dire leur placement dans des alvéoles en plastique thermoformé recouvertes d'un film d'aluminium. Cette étape implique un contact direct avec le médicament.
- Deuxième conditionnement : les blisters sont ensuite insérés dans des boîtes avec des notices, formant le produit final prêt à la distribution.

Actuellement, un capteur est déjà installé entre la machine du premier conditionnement et celle du second. Ce capteur scanne les blisters pour vérifier leur conformité (forme correcte, présence de tous les comprimés, etc.). Si les blisters sont conformes, ils sont transférés vers la machine suivante ; sinon, ils sont automatiquement éjectés.

Dans la deuxième machine, les blisters sont emballés dans des boîtes. Un autre capteur (scanner) vérifie la conformité de ces boîtes (présence du nombre correct de blisters, de la notice, qualité de l'emballage, etc.). Les boîtes non conformes sont également rejetées. Enfin, un contrôle visuel est effectué par le personnel pour vérifier une dernière fois la conformité du produit fini.

C'est à ce niveau que nous proposons d'intégrer un capteur IoT, qui permettrait d'automatiser la collecte d'informations relatives à la conformité des boîtes. Ce capteur serait connecté à un réseau et enverrait en temps réel les données à une base centralisée. Ces données pourraient être visualisées via un tableau de bord (dashboard), accessible depuis le poste de travail du *Manufacturing Manager* ou depuis une application mobile. Cela permettrait au responsable de suivre la production à distance, sans avoir à se rendre physiquement à chaque poste pour obtenir des informations.

Le deuxième axe du projet vise à mieux comprendre les pertes potentielles entre la presse à comprimés (machine qui forme les comprimés) et le conditionnement final. Aujourd'hui, grâce au capteur déjà présent dans la machine de deuxième conditionnement, il est possible de connaître le nombre exact de boîtes produites. En revanche, pour connaître le nombre de comprimés conformes produits, un autre capteur devrait être installé au niveau de la presse à comprimés.

Cette presse détecte déjà les comprimés défectueux (cassés, mal formés, etc.) et les écarte. En installant un capteur IoT à ce niveau, nous pourrions comptabiliser le nombre de comprimés conformes produits en temps réel. Il serait alors possible de comparer ce nombre au nombre de comprimés présents dans les blisters et les boîtes finales.

Cette comparaison permettrait de détecter et localiser les pertes éventuelles dans le processus de transfert (entre les machines ou entre les salles), au niveau du blister, ou encore lors du conditionnement secondaire. Cela offrirait des pistes précieuses pour améliorer l'efficacité et la qualité globale de la production.

Conclusion

Ce chapitre a présenté la méthodologie de notre recherche, les outils utilisés ainsi que la démarche suivie pour la collecte et l'analyse des données. Il pose les bases nécessaires à la compréhension des résultats exposés dans le chapitre suivant.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons mené cette étude dans le but de répondre à la problématique suivante : « De quelle manière l'exploitation actuelle de l'Internet des objets au sein de l'entreprise El Kendi contribue-t-elle à l'optimisation de son processus de production, et quelles perspectives d'innovation sont envisagées dans ce cadre ? »

Pour y répondre, nous avons d'abord posé un cadre théorique dans lequel nous avons explicité les concepts fondamentaux relatifs aux processus de production industrielle, à l'Industrie 4.0 et à l'Internet des objets (IoT). Cette base conceptuelle nous a permis d'aborder notre étude de terrain avec des outils d'analyse pertinents.

Dans un premier temps, nous avons présenté le fonctionnement des processus de production dans l'industrie pharmaceutique, en nous concentrant sur les exigences de qualité, de traçabilité et d'efficacité propres à ce secteur. Nous avons ensuite exploré l'évolution de la digitalisation industrielle, en particulier le rôle croissant des technologies IoT dans la transformation des systèmes de production.

L'étude empirique s'est appuyée sur une méthodologie qualitative, principalement fondée sur des entretiens semi-directifs et l'analyse de documents internes à l'entreprise SPA El Kendi. Cette approche nous a permis d'identifier les usages actuels, les limites et les perspectives d'intégration de l'IoT dans les processus de production pharmaceutique.

Nos résultats ont mis en évidence une digitalisation en cours mais encore partielle. Si l'entreprise dispose d'une infrastructure technologique avancée (ERP, HMI, virtualisation), l'Internet des objets y est encore peu déployé. Les interfaces homme-machine sont présentes et jugées efficaces, mais leur manque d'interopérabilité et l'absence de centralisation des données limitent leur impact. Les projets en cours (digitalisation des log books, intégration d'une GMAO, installation de capteurs connectés) témoignent toutefois d'une volonté d'évolution vers une production plus connectée, traçable et performante.

Nous avons pu conclure que l'IoT représente un levier stratégique pour améliorer :

- la traçabilité en temps réel ;
- la maintenance préventive ;

- la supervision des lignes de production ;
- et l'optimisation globale des flux de fabrication.

Cependant, cette transition vers l'Industrie 4.0 implique plusieurs défis, notamment en matière d'infrastructure réseau, d'interopérabilité des systèmes, de formation du personnel et de gouvernance des données.

Ainsi, même si l'exploitation de l'IoT reste aujourd'hui limitée chez El Kendi, notre étude confirme que son intégration progressive est perçue comme essentielle pour accroître l'efficacité, la qualité, la traçabilité et la réactivité des processus de production. Elle ouvre également des perspectives concrètes d'innovation, à condition d'adopter une stratégie claire, collaborative et structurée autour de la transformation numérique.

Enfin, bien que notre étude ait permis d'atteindre ses objectifs, elle présente certaines limites, notamment la contrainte temporelle de la recherche, la difficulté d'accès à certaines données internes sensibles, ainsi que l'absence d'observation directe sur le terrain. Par ailleurs, le caractère évolutif des technologies étudiées appelle à des recherches futures plus approfondies pour suivre l'évolution de leur mise en œuvre.

Bibliographie

Chapitre 1 :

1|2

- UNIVERSITÉ CHOUAIB DOUKKALI & ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES APPLIQUÉES. (2019). *Gestion de stock et approvisionnement* [Cours universitaire en ligne]. Consulté le 9 mai 2025 sur <https://fr.scribd.com/document/645214161/Gestion-de-stock-1-pdf>
- Genouvrier, É., Désirat, C., & Hardé, T. (1977). *Nouveau dictionnaire des synonymes Larousse*. Librairie Larousse.
- INSEE. (2021, 10 septembre). *Production (comptabilité nationale)*. INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES. Consulté le 16 avril 2025 sur [https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1816#:~:text=La%20production%20est%20une%20activit%C3%A9,fournir%20des%20services%20\(P1\)](https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1816#:~:text=La%20production%20est%20une%20activit%C3%A9,fournir%20des%20services%20(P1))
- Shopify. (2024, 27 octobre). *Fabrication industrielle : définition, exemple, types et guide*. Shopify. Consulté le 10 avril 2025 sur <https://www.shopify.com/fr/blog/fabrication-industrielle>
- Gouvernement du Québec. (2025, 28 janvier). *Production agricole*. Gouvernement du Québec. Consulté le 17 avril 2025 sur <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles>
- StudySmarter. (2024, 9 septembre). *Productions artisanales*. StudySmarter. Consulté le 18 avril 2025 sur <https://www.studysmarter.fr/resumes/archeologie/sites-archeologiques-et-fouilles/productions-artisanales/>
- May, N. (2000). *Production des services et relation de service : quelques perspectives d'analyse*. Cahiers RAMAU, (1), 61–76. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://cahiers-ramau.edinum.org/573>
- Charron, J.-L., Separi, S., & Bertrand, F. (2018). *Management : l'essentiel en fiches*. Dunod.
- Saasaa, W. (2025). *Partie 1 - Les facteurs de production et leurs combinaisons*. Wiki des savoirs, Académie de Créteil. Consulté le 14 avril 2025 sur

https://savoirs.cerpeg.fr/index.php/Partie_1_-

[Les facteurs de production et leurs combinaisons](#)

- Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique. (2012, 3 février). *La fonction Production*. Facileco. Consulté le 20 avril 2025 sur <https://www.economie.gouv.fr/facileco/fonction-production>
- Demeestère, R., Lorino, P., & Mottis, N. (2017). *Pilotage de l'entreprise et contrôle de gestion* (6e éd.). Dunod.
- ANNABAC. (2025). *Les facteurs de production. Fiche de révision*. Consulté le 14 avril 2025 sur <https://www.annabac.com/recherche?keys=Les+facteurs+de+production#>
- Tanner. (2023, 8 février). *Qu'est-ce qu'un processus de production et pourquoi est-il si important pour toute industrie ?* Tanner AG. Consulté le 20 avril 2025 sur <https://www.tannerag.ch/fr/news-et-applications/qu-est-ce-qu-un-processus-de-production-et-pourquoi-est-il-si-important-pour-toute-industrie-134008>
- Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (s. d.). *Chapitre 4 : Les fonctions de l'entreprise* [Cours universitaire, fichier PDF]. Consulté le 3 avril 2025 sur <https://www.ummtto.dz/fsecsg/wp-content/uploads/2019/03/Gestion-dentreprise-chapitre-4-2SFC-section-B.pdf>
- HASSANI, Khadidja Khaoila (2024). *Rapport de stage de découverte de l'entreprise SNC Algeria Jeunes*, Tipaza, EHEC, p. 20.
- Courtois, A., Pillet, M., & Martin-Bonnefous, C. (2003). *Gestion de production* (4e éd.). Éditions d'Organisation.
- RUBAFILM. (2020, 20 août). Flux poussé VS flux tiré ? RUBAFILM. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.rubafilm.com/flux-pousse-vs-flux-tire/#:~:text=Flux%20pouss%C3%A9%20et%20flux%20tir%C3%A9%20%3A%20d%C3%A9finition&text=Dans%20le%20cas%20du%20flux,n'y%20ait%20de%20com%20mande>
- Oracle. (s. d.). *Qu'est-ce que l'ERP ?* Oracle Afrique. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.oracle.com/africa-fr/erp/what-is-erp/#:~:text=L'acronyme%20ERP%20signifie%20Enterprise,finance%2C%20la%20comptabilit%C3%A9%2C%20etc>

- 1LIFE. (s. d.). Qu'est-ce que le MRP (Materials Requirements Planning) et le MRP2 (Manufacturing Resources Planning). Oracle. Consulté le 25 avril 2025 sur <https://www.oracle.com/africa-fr/erp/what-is-erp/#:~:text=L'acronyme%20ERP%20signifie%20Enterprise,finance%2C%20la%20comptabilit%C3%A9%2C%20etc>
- Georges, J. (2010). Organisation et gestion de la production (4e éd.). Dunod
- L'Expo Permanente. (s. d.). *Le logiciel MES pour le pilotage de la production* | AVEVA MES Operations. Usine Nouvelle. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.usinenouvelle.com/expo/le-logiciel-mes-pour-le-pilotage-de-la-p-p384679450.html>
- Visiativ. (2024). *Définition : Logiciel MES*. Visiativ. Consulté le 28 avril 2025 sur <https://www.visiativ.com/definition/mes/>
- Businessmap. (s. d.). *Qu'est-ce que Kanban ? Guide du Débutant*. Businessmap. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://businessmap.io/fr/ressources/debuter-avec/methode-kanban>
- Gantt.com. (s. d.). *Comment créer un diagramme de Gantt*. Gantt.com. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.gantt.com/fr/creation>

2|2

- *متطلبات نيل شهادة دكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية* (2016). ف. محبوب، [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Faculté des sciences économiques, commerciales et des sciences de gestion]. Biskra.
- Statista. (2024). Pharmaceuticals - Algeria. Consulté le 28 avril 2025 sur <https://www.statista.com/outlook/hmo/pharmaceuticals/algeria>
- ANSM. (2019). *Guide européen des Bonnes Pratiques de Fabrication. Chapitre 1 : Système qualité pharmaceutique* [PDF]. Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://ansm.sante.fr/uploads/2020/10/20/2019-guide-bpf-mai-2019-3.pdf>
- Rjem, N. (2018). *Le contrôle de qualité de la production du Neurovit 250-250 mg* [Mémoire de master, Université Badji Mokhtar].
- LEEM. (2024, 26 février). *La production pharmaceutique c'est quoi ? Les entreprises du médicament*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.leem.org/la-production->

<https://sante.gouv.fr/soins-et-maladies/medicaments/le-bon-usage-des-medicaments/article/qu-est-ce-qu-un-medicament#:~:text=5111-1>

- Gurung, J., Anjudikkal, J., & Pulikkal, A. K. (2020, 15 novembre). *Systèmes amphiphiles médicament-additif dans des milieux mixtes solvant-eau aqueux et organiques : un compte rendu complet des propriétés physico-chimiques*. Journal des liquides moléculaires, v. 318.
- Talbert, M., Willoquet, G., & Gervais, R. (2009). *Le guide pharmaco clinique*. Wolters Kluwer.
- Naturactive. (s. d.). Guide de la Phytothérapie. Consulté le 26 avril 2025 sur <https://www.naturactive.fr/blog-sante-naturelle/guide-pratique/guide-de-la-phytotherapie#:~:text=D%C3%A9finition%20de%20la%20Phytoth%C3%A9rapie>
- Organisation mondiale de la santé. (2023, 29 août). Surdose d'opioïdes. Organisation mondiale de la santé. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/opioid-overdose>
- Techno-Science.net. (2025). Pavot somnifère - Définition et Explications. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Pavot-somnifere.html>
- Larousse. (s. d.). Glande surrénale - Encyclopédie médicale. Consulté le 27 avril 2025 sur https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/glande_surr%C3%A9nale/16348
- Larousse. (s. d.). Trypsine - Encyclopédie médicale. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/trypsine/16732>
- Larousse. (s. d.). Micro-organisme. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/micro-organisme/51283>
- Larousse. (s. d.). Antibiotique - Encyclopédie médicale. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/antibiotique/11230>
- Larousse. (s. d.). Chimie organique. Dans Encyclopédie Larousse en ligne. Consulté le 27 avril 2025 sur https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/chimie_organique/75264
- Larousse. (s. d.). Argile. Dans Encyclopédie Larousse en ligne. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/argile/22791>
- Larousse. (s. d.). Chlorure. Dans Encyclopédie Larousse en ligne. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/chlorure/33538>

- Larousse. (s. d.). *Biologie moléculaire*. Dans Encyclopédie médicale Larousse en ligne. Consulté le 27 avril 2025 sur https://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/biologie_mol%C3%A9culaire/11568
- Liguori, G. (2016). *Les formes pharmaceutiques*. *Pharmacien hospitalier – CH M Despinoy, IFSI 1re année*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://promotion20162019.files.wordpress.com/2016/10/les-formes-pharmaceutiques.pdf>
- VIDAL. (2021, 13 avril). *Les différentes formes de médicaments*. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://www.vidal.fr/medicaments/utilisation/regles-bon-usage/formes-medicament.html>
- Levacher, E. (2016, 1 juillet). *PHI 41 Pharmacotechnie industrielle* (3e éd.). Institut des Métiers et des Technologies.
- Berrahmoun, Y., & Hammoudi, M. (2020). *Optimisation du procédé de fabrication d'une forme pharmaceutique sèche en vue d'améliorer son homogénéité et sa dissolution* [Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida].
- Le Hir, A., Chaumeil, J.-C., & Brossard, D. (2009). *Pharmacie galénique : Bonnes pratiques de fabrication des médicaments* (9e éd.). Elsevier Masson.
- Allo, O., Blanc, P., & Dalmaso, M.-A. (2013, 14 mars). *Pharmacie galénique B.P.* (3e éd.). Wolters Kluwer.
- Gad, S. C. (2008, 17 mai). *Pharmaceutical manufacturing handbook: Production and processes*. Wiley-Interscience.
- France, H. (2025, 12 mars). *Challenge sur les réseaux sociaux ou pas... La prise de paracétamol en trop grande quantité est dangereuse*. Franceinfo. Consulté le 27 avril 2025 sur <https://france3-regions.franceinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/alpes-maritimes/nice/challenge-sur-les-reseaux-sociaux-ou-pas-la-prise-de-paracetamol-en-trop-grande-quantite-est-dangereuse-3120643.html>
- MADE-IN-CHINA. (s. d.). *Cabine d'échantillonnage à flux verticale conforme aux BPF Salle pesée*. Consulté le 25 avril 2025 sur https://fr.made-in-china.com/co_shanghai-marya/product_GMP-Standard-Vertical-Flow-Sampling-Booth-Weighing-Room_uoyisgrng.html

- Mahato, R. I., & Narang, A. S. (2012). *Pharmaceutical dosage forms and drug delivery* (2e éd.). CRC Press.
- Bouillon-Camara, A.-L. (2005). *Extrapolation du procédé de granulation humide en mélangeur haute vitesse* [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine].
- Feinberg, M. (2001). *L'assurance qualité dans les laboratoires agroalimentaires et pharmaceutiques* (2e éd., pp. 2–3). Édition Tec & Doc.
- Hulse, J. H. (2008). *Développement durable : un avenir incertain* (pp. 305–312). Les Presses de l'Université Laval.
- Kopp-Kubel, S. (1998). *Good Manufacturing Practices (GMP) in Pharmaceutical Production* (pp. 45–47). Organisation mondiale de la santé.
- Mansouri, M. (2008, 28–30 avril). *Réglementation, qualité et problématiques des médicaments : Expérience algérienne* [Conférence]. Conférence sur les systèmes de santé en Afrique, Ministère de la Santé, de la Population et de la Réforme Hospitalière, OMS AFRO, Ouagadougou, 3–5.
- Ziani, L. (2021). *L'industrie du médicament en Algérie : État des lieux et contraintes*. Revue Abaad Iktissadia, 11, 419–443.
- Artiges, A. (2006). *La pharmacopée européenne et la direction européenne de la qualité du médicament au Conseil de l'Europe*. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 190(9), 1903–1911.
- Partouche, D. (2016, 4 octobre). *Édition 2017 de la Pharmacopée européenne*. Université de Paris. Consulté le 25 avril 2025 sur <https://numerabilis.u-paris.fr/medica/blog/index.php/pharmacopee-europeenne-2017/>

Chapitre 2 :

1|2

- Bouron, J.-B. (2023, mai). *Industrie*. Géo Confluences. Consulté le 2 mars 2025 sur <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/industrie>
- Caliste, L., & Carnino, G. (2022). *Qu'est-ce que l'industrie ?* OpenEdition Journals, 2022, 219–242. Consulté le 1 mars 2025 sur <http://journals.openedition.org/artefact/13273>

- Flacher, D., & Pelletan, J. (2007). *Le concept d'industrie et sa mesure : origines, limites et perspectives – Une application à l'étude des mutations industrielles*. *Économie et statistique*, 405(1), 13–46.
- Clark, C. (1940). *The productivity of secondary industry*. Dans *The Conditions of Economic Progress* (pp. 275–318). London : Macmillan and Co. Limited.
- INSEE. (2021, 11 février). *Industrie : définition*. Institut National de la Statistique et des Études Économiques. Consulté le 2 mars 2025 sur <https://tinyurl.com/3phs94vd>
- Even, A. (2018). *Fiche de lecture : La quatrième révolution industrielle de Klaus Schwab*. La commission Économie, Next Humanity. Consulté le 1 mars 2025 sur <https://nxu-thinktank.com/wp-content/uploads/2018/02/Klaus-Schwab.pdf>
- Open-Prod. (2022). *Qu'est-ce que l'industrie 4.0 ?* Open-Prod. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://open-prod.com/wp-content/uploads/2022/09/visuel-evolution-industrie.jpg>
- Zhang, Y. (2020, 14 février). *Industries 1.0 – 3.0*. Hapticmedia. Consulté le 3 mars 2025 sur <https://hapticmedia.com/blog/fr/industrie-4.0/>
- L'Étudiant. (2023, 24 août). *La révolution industrielle : définition, contexte et inventions majeures*. La cellule contenue de L'Étudiant. Consulté le 5 mars 2025 sur <https://tinyurl.com/mr3wvs6s>
- Cross Data. (s. d.). *Comment l'intelligence artificielle transforme les processus de production dans l'industrie ?* Cross Data. Consulté le 5 mars 2025 sur <https://www.crossdata.tech/comment-lintelligence-artificielle-transforme-les-processus-de-production-dans-lindustrie/>
- Bending, D., Lau, K., Schulte, J., & Endrib, S. (2021). *Industrie 5.0*. *Industrie 4.0 Management*, 37(6), p. 20–22.
- Sanogo, K. (2024). *Optimisation de l'ordonnancement des tâches de transport des robots intelligents et collaboratifs dans le contexte de l'industrie 5.0* [Thèse de doctorat, École doctorale Sciences et Métiers de l'Ingénieur].
- Shirir, S., Jaegler, A., & Montoya-Torres, J. R. (2023). *Uncovering Industry 4.0 technology attributes in sustainable supply chain 4.0: A systematic literature review*. *Business Strategy and the Environment*, 32(7), 4143–4166.
- Mecheri, C. (2021). *Éthique et Industrie 4.0 : définition et témoignage industriel*. LISTIC ; LAMIH. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03413885>

- Babinet, G. (2020, 18 novembre). Refondre les politiques publiques avec le numérique. Administration territoriale, État, citoyens (Collection Les beaux livres du savoir). Dunod.
- Spencer, S. (2021, 24 août). *Les 4 principes de conception de l'industrie 4.0*. VKS. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://vksapp.com/fr/blogue/4-design-principes-de-l-industrie-4>
- Shaping a World of Trust. (s. d.). *Quand la transparence devient une expertise*. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://group.bureauveritas.com/fr/magazine/quand-la-transparence-devient-uneexpertise>
- Spencer, S. (2021, 26 juillet). *Process vs. Resource: Which Implementation is Best for You?* VKS. Consulté le 6 mars 2025 sur <https://vksapp.com/blog/process-vs-resource>
- Systemes. (2021, 26 juillet). *Qu'est-ce que l'Industrie 4.0 ?* Consulté le 6 mars 2025 sur <https://www.ip-systemes.com/details-qu+est+ce+que+l+industrie+4+0-798.html>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2019). *Industrie 4.0 et Lean : Hiérarchie, amélioration ou complémentarité ?* Communication présentée à CIGI QUALITA.
- Danjou, C., Pellerin, R., & Rivest, L. (2017). *Le passage au numérique : Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO).
- Chraïbi Kaadoud, I. (2018, 25 septembre). Les challenges de l'IA aujourd'hui. Onepoint. Consulté le 8 mars 2025 sur <https://www.groupeonepoint.com/fr/publications/challenges-ia-aujourd'hui/>
- Google Cloud. (s. d.). Intelligence artificielle (IA) ou machine learning (ML). Google. Consulté le 7 mars 2025 sur <https://cloud.google.com/learn/artificial-intelligence-vs-machine-learning?hl=fr>
- Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing* (NIST Special Publication No. 800-145). National Institute of Standards and Technology.
- KAGERMANN, Henning, WAHLSTER, Wolfgang, & HELBIG, Johannes
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0* (Final report of the Industrie 4.0 Working Group No. 0).

- Wu, X. (2022). *Transformation des systèmes de production existants et de leurs systèmes d'information d'entreprise (EIS) en systèmes de production cyber-physiques (CPPS) dans le contexte de l'industrie 4.0* [Thèse de doctorat, HESAM Université].
- Saleh, I. (2018). Internet des Objets (IdO) : Concepts, enjeux, défis et perspectives. *Revue Internet des Objets*, 2.
- Matooma. (s. d.). *Le guide de Machine to Machine*. Matooma Wireless Logic Group. Consulté le 10 mars 2025 sur <https://www.matooma.com/fr/s-informer/univers-du-m2m-et-iot>
- Weber, R. H., & Weber, R. (2010). *Internet of things: Legal perspectives*. Springer.
- L., N. (2023, 23 février). L'industrie 4.0 : le grand défi français. *Comparateur Banque*. Consulté le 10 mars 2025 sur <https://www.comparateurbanque.com/comparatif-banque/lindustrie-40-le-grand-defi-francais/>
- Visiativ. (2022, 19 décembre). *Simulation numérique : définition et enjeux*. Visiativ. Consulté le 10 mars 2025 sur <https://www.visiativ.com/actualites/actualites/simulation-numerique-definition-et-enjeux/>

2|2

- Larras, M., & Khalfouni, D. (2019). *Défis de sécurité de l'Internet des Objets : Problèmes et solutions* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou].
- UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS. (2018). *Cadre de sécurité applicable à l'Internet des objets fondé sur le modèle passerelle*. UIT. Consulté le 10 mai 2025 sur https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-X.1361-201809-I!!PDF-F&type=items
- Baland, C., Cauquil, D., Gayet, T., Juvigny, J., Lifchitz, R., & Nguyen, N.-K. (2016). *La sécurité de l'Internet des objets* [Livre blanc]. Econocom.
- Cluster of European Research Projects on the Internet of Things. (2010, mai). *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*. CERP-IoT Cluster, European Commission.
- Challal, Y. (2012). *Sécurité de l'Internet des objets : vers une approche cognitive et systémique* [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne]. HAL.

- Haddab, Y. (s. d.). *Introduction à l'internet des objets (IdO – IoT)* [Cours universitaire en ligne PDF]. Université de Montpellier. Consulté le 10 mai 2025 sur <https://www.lirmm.fr/~seriai/uploads/Enseignement/iot.pdf>
- Saleh, I. (2018). *Internet des Objets (IdO) : Concepts, Enjeux, Défis et Perspectives*. Laboratory, Université Paris 8.
- Larras, M., & Khalfouni, D. (2019). *Défis de sécurité de l'Internet des Objets : Problèmes et solutions* [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou].
- M2M. (s. d.). *Qu'est-ce que le M2M et à quoi sert le machine to machine ?* M2M network. Consulté le 10 mai 2025 sur <https://www.m2m.fr/guide/m2m/>
- Evans, D. (2011, avril). *L'Internet des objets : Comment l'évolution actuelle d'Internet transforme-t-elle le monde ?* Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).
- Bouchareb, A. (2023, avril). *Développement d'une architecture flexible pour la gestion et la sécurité des transactions et flux de données pour les objets connectés dans le contexte de la maison intelligente* [Mémoire de master, Université du Québec].
- Li, D., Deng, L., Liu, W., & Su, Q. (2020). *Improving communication precision of IoT through behavior-based learning in smart city environment*. *Future Generation Computer Systems*, 108, 512–520.
- Baskar, S., Periyannayagi, S., Mohammed Shakeel, P., & Dhulipala, V. R. S. (2019). *An energy persistent range-dependent regulated transmission communication model for vehicular network applications*. *Computer Networks*, 152, 144–153.
- Smart Energy International. (2019, 23 octobre). *How Smart Grid Operations, aligned to ITIL, can enable the Smart Energy Transition*. Smart Energy International. Consulté le 10 mai 2025 sur <https://www.smart-energy.com/features-analysis/getting-ready-to-operate-the-smarter-grid/amp/>
- Swaroop, A., Polkowski, Z., Correia, S. D., & Virdee, B. (2023, 29 décembre). *Proceedings of Data Analytics and Management (Vol. 4)*. Springer Singapore. Lecture Notes in Networks and Systems. ICDAM 2023.
- Muhammad, G., Alshehri, F., Karray, F., El Saddik, A., Alsulaiman, M., & Falk, T. H. (2021, décembre). *A comprehensive survey on multimodal medical signals fusion for*

smart healthcare systems. Information Fusion, 76, 355–375.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1566253521001330>

- Hostwinds. (2024, 23 mai). *فصول IPv4: كيف يتم استخدامها*.
<https://www.hostwinds.ae/blog/ipv4-classes-what-are-they-and-how-are-they-used>
- Gupta, L. (2025, 1^{er} avril). *What is REST ?* Consulté le 15 mai 2025, sur <https://restfulapi.net/>
- MDN Web Docs. (2024, 17 décembre). *HTTP*. Mozilla Developer Network. Consulté le 16 mai 2025, sur <https://developer.mozilla.org/fr/docs/Web/HTTP>
- Hijdeb, A. (2017). *Implémentation d'un protocole d'élection d'un serveur d'authentification dans l'internet des objets* (Mémoire de fin de cycle Master 2 en Informatique Professionnel, option ASR : Administration et Sécurité des Réseaux). Université Abderrahmane Mira, Bejaïa.
- 3Pillar Global. (2020, 7 avril). *Industrial IoT – Challenges, Risks & Pitfalls*. Consulté le 12 mai 2025, sur <https://www.3pillarglobal.com/insights/blog/industrial-iot-challenges-risks-pitfalls/>

Chapitre 3 :

1|2

- He, Z. (2022, 21 janvier). *Algeria Pharma Market*. LinkedIn.
<https://www.linkedin.com/pulse/algeria-pharma-market-zhengchun-harry-he/>
- بعوني، ليلي (2021). *الصناعة الصيدلانية في الجزائر، مجلة القسطاس للعلوم الإدارية والاقتصادية والمالية، العدد 1، المجلد 3، الصفحات من 70-90، الصفحة 77.*
- حديدي، فتيحة ونور الدين بربار (2023). *مساهمة الدولة في دعم وتطوير المنتجات المحلية : دراسة حالة قطاع الصناعات الصيدلانية، مجلة أبحاث اقتصادية معاصرة، العدد 1، المجلد 6، الصفحات من 43-64، الصفحة 51.*
- IQVIA. (2024, juillet). *Middle East & Africa pharmaceutical market insights* (32e éd.) [rapport en ligne]. Consulté le 15 mai 2025, sur https://file:///C:/Users/VIP17JUN24/Downloads/240709_iqvia_mea-pharmaceutical-market-quarterly-report_q1-2024.pdf
- Khammes, A., & Douiou, M. (2021). *Le développement de la production locale de produits pharmaceutiques, en Algérie, une opportunité de croissance pour le groupe*

HYDRAPHARM (Mémoire de master en management stratégique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

- Khoudour, N. (2025, 20 mai). *Quels laboratoires dominent les ventes en pharmacie en 2024 ?* Dans Pillpilot [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://pillpilot.net/quels-laboratoires-dominent-les-ventes-en-pharmacie-en-2024/>
- MS PHARMA. (s. d.). *Global presence*. Dans MS Pharma [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://www.mspharma.com/global-presence>
- World Health Organization. (2017, 12 juillet). *Guidance on the use of International Non-proprietary Names (INNs)* [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur [https://www.who.int/teams/health-product-and-policy-standards/inn/guidance-on-inn#:~:text=International%20Nonproprietary%20Names%20\(INN\)%20identify,known%20as%20a%20generic%20name](https://www.who.int/teams/health-product-and-policy-standards/inn/guidance-on-inn#:~:text=International%20Nonproprietary%20Names%20(INN)%20identify,known%20as%20a%20generic%20name)
- MS Pharma. (2022, 18 mai). *El Kendi Product: Algerian Quality Generic, El Djazair Healthcare, Dakar, Senegal* [présentation en ligne PDF]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://www.miph.gov.dz/fr/wp-content/uploads/2022/05/Le-produit-El-Kendi-Un-generique-Algerien-de-qualite.pdf>
- MS PHARMA. (s. d.). *About Us*. Dans Ms Pharma. [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://www.mspharma.com/about-us?mnuId=2943>
- Sidjilcom. (s. d.). *Fiche descriptive de l'entreprise El Kendi Industrie du Médicament*. Dans le site du Centre National du Registre du Commerce, [en ligne]. Consulté le 25 mai 2025, sur <https://sidjilcom.cnrc.dz/repertoire-des-commerçants-detaille>
- Bessaïah, M. (2025, 27 janvier). *El Kendi, renforce et diversifie ses capacités de production avec la nouvelle unité de fabrication de produits pharmaceutiques d'oncologie en Algérie*. Interfil Algérie. Consulté le 27 mai 2025, sur <https://www.interfilalgerie.com/el-kendi-renforce-et-diversifie-ses-capacites-de-production-avec-la-nouvelle-unite-de-fabrication-de-produits-pharmaceutiques-doncologie-en-algerie/>

- BOUCHAREB, A. (2023). *Développement d'une architecture flexible pour la gestion et la sécurité des transactions et flux de données pour les objets connectés dans le contexte de la maison intelligente* (Mémoire de maîtrise, Université de Québec).
- BPIFRANCE. (2021). *IoT et entreprises : vers une industrie connectée et durable. Rapport de synthèse* [rapport en ligne]. Consulté le 1 juin 2025, sur <https://www.bpifrance.fr>
- Saha, N., Das, S., & Chakraborty, S. (2021). *IoT based stability chamber for pharmaceutical industry using PLC and cloud connectivity*. International Journal of Scientific & Engineering Research, 12(9), 505–512.
- Papathanasiou, M. M., Pistikopoulos, E. N., & Dua, V. (2019). *Multi-parametric model predictive control for a simulated moving bed process*. Computers & Chemical Engineering, 127, 1–14.
- Jovancevic, A., Pinguet, J., Viala, P., & Deremetz, M. (2017). *Air-Cobot, a collaborative mobile robot for aircraft inspection*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 44, 127–136.

Chapitre 4 :

- Caumont, D. (1988). *Les études de marché* (éd. Dunod). Paris. p. 45.
- PELLEMANS, P. (1999). *Recherche qualitative en marketing*. De Boeck Université. Paris, p. 16.
- Chabani, S., & Ouacherine, H. (2019). *Guide de méthodologie de la recherche en sciences sociales* (2e éd.). Alger.
- Hennous, I. (2023). *L'intégration digitale dans le processus de production* (Mémoire de master, EHEC, Tipaza).

- Berg, B. L., & Lune, H. (2013). *Qualitative research methods for the social sciences* (Global ed., p. 66). England: Pearson.

Annexes

Annexe numéro 1 : le guide d'entretien

GUIDE D'ENTRETIEN :

Interviewé :

La qualité :

La date d'entretien :

Intro du guide :

Bonjour M./Mme,

En vue de la préparation du mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme de Master en sciences commerciales, option : Management de la chaîne logistique, sous la thématique « **L'IoT au service de l'optimisation du processus de production des produits pharmaceutiques** »,

Je réalise une étude pratique au sein de l'entreprise El Kendi, pour la rédaction de mon mémoire. Mon objectif est de citer les opportunités possibles et réalisables en intégrant la technologie IoT dans les différents processus industriels de l'entreprise.

Pour enrichir ma compréhension sur le sujet et proposer des recommandations utiles, je souhaiterais réaliser un entretien visant à recueillir des informations sur l'usage des technologies avancées dans les processus industriels ; la manière dont l'IoT est actuellement utilisé, les lacunes, ainsi que vos ambitions futures.

Cet entretien est d'une durée approximative de 45 minutes. Il sera enregistré uniquement dans le cadre de la retranscription pour mon mémoire. Évidemment, vous pourrez obtenir une copie de l'enregistrement si vous le souhaitez.

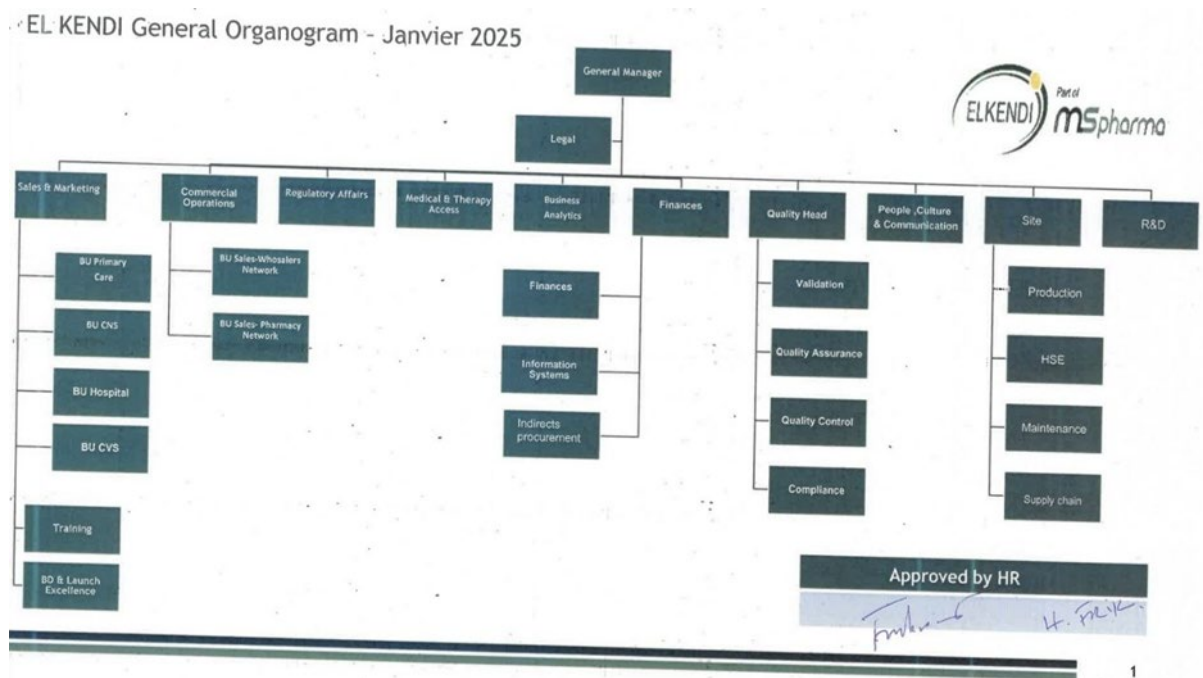
Merci infiniment pour votre collaboration précieuse.

Problématique : De quelle manière l'exploitation actuelle de l'Internet des objets au sein de l'entreprise El Kendi contribue-t-elle à l'optimisation de son processus de production, et quelles perspectives d'innovation sont-elles envisagées dans ce cadre ?

Thème 1 : Présentation du personnel Interviewé	1.Quel poste occupez-vous actuellement ? 2.Depuis combien de temps occupez-vous ce poste ? 3.Quelles sont vos principales tâches ?
Thème 2 : Idée sur les technologies utilisées par l'entreprise	1.Quelles sont les technologies avancées utilisées au sein de l'entreprise El Kendi ? 2.Quels sont les outils informatiques que vous utilisez pour gérer votre flux informationnel ?
Thème 3 : Des infos sur l'Internet des objets	1. Que pensez-vous de l'Internet des objets ? 2. Quelles sont les formes d'utilisation de cette technologie dans l'entreprise actuellement ?
Thème 4 : Utilisation des HMI	1. Je suis en train de faire un stage au sein de votre entreprise, j'ai vu que la plupart de vos machines sont équipées de HMI (Human Machine Interfaces), pouvez-vous m'expliquer le rôle d'un HMI ? 2. Quel est votre rôle dans le processus de leur utilisation ? 3. Quelles données sont archivées par ces interfaces ? 4. Comment ces données sont-elles traitées ? (archivage, suivi en temps) 5. Qui sont les personnes autorisées à consulter ces données ?
Thème 5 : Interaction homme-machine	1. Comment les opérateurs interagissent-ils avec les HMI ? 2. Ces opérateurs sont-ils formés ? Ou l'interaction avec ces interfaces concerne-t-elle seulement les techniciens ?
Thème 6 : Cas d'anomalie	1. En cas de panne au niveau d'un HMI, quelles seront les conséquences pour la production ? Est-ce que vous pouvez les réparer d'une manière rapide et efficace ?
Thème 7 : Impact de l'utilisation des HMI	1. Comment l'utilisation de ces interfaces influence-t-elle la gestion des ressources, la prévision des pannes et les interventions de maintenance, en termes de coûts et d'efficacité ? (Coûts) 2. Quel a été l'impact de l'utilisation de ces HMI sur la qualité des produits fabriqués ? Avez-vous constaté une meilleure traçabilité ou une réduction des défauts ? (qualité, maintenance prédictive et traçabilité des produits)

<p>Thème 8 : Niveau de maturité numérique</p>	<p>1. Quelle est votre vision sur l'adoption de technologies plus connectées à l'avenir ? Quelle est votre idée de cette connectivité ?</p> <p>2. Percevez-vous des manques ou des limites dans l'utilisation de ces interfaces ?</p>
<p>Thème 9 : Perspective d'évolution</p>	<p>1. Quelles évolutions envisagez-vous pour le futur de l'entreprise, en ce qui concerne l'intégration des technologies avancées ?</p> <p>2. Quels sont vos projets futurs existants ?</p> <p>3. Quel est votre degré d'ouverture à des innovations IoT ?</p>

Annexe numéro 2 : L'organigramme de l'entreprise El Kendi



Annexe numéro 3 : Formulaire de consentement

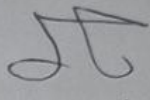
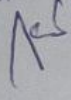


Interviewé	La qualité	Date d'entretien	Signature
Maamri Yacine	Manufacturing Manager	12 mai 2025 2:00 pm	
Elsaidaoui Bassel	IT Manager	25 mai 2025 11:30 am	
Benkara Nataja 	Eng Section Head	26/05/2025 10h15	
Fai Iphan	QC Section Head	27/05/2025 11:30	

Table de matières

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Sommaire	
Introduction générale	1
Partie 1 : Étude Bibliographique	
Chapitre 1 : De la production industrielle aux processus pharmaceutiques	5
Introduction.....	6
Section 1 : Introduction à la production industrielle	7
1.1. La production : définition et impact en milieu industriel.....	7
1.1.1. Définition de la notion de production	7
1.1.2. Les secteurs de production.....	8
1.1.3. La fonction production dans l'entreprise.....	9
1.2. Le processus de production : rôle et répartition des activités	10
1.2.1. Rôle d'un processus de production.....	11
1.2.2. Les unités de travail dans un processus de production.....	12
1.2.3. Répartition des activités stratégiques et opérationnelles.....	12
1.3. L'organisation de la fonction de production.....	13
1.3.1. Rôle fonctionnel des services.....	14
1.3.2. Rôle opérationnel des services	15
1.4. Typologie des systèmes de production.....	16
1.4.1. Selon l'organisation du flux de production.....	16
1.4.2. Selon la relation avec le client.....	16
1.4.3. Selon la quantité produite et la répétitivité.....	17
1.5. Méthodes et outils de gestion de la production.....	17

1.5.1. Logiques de pilotage de la production.....	18
1.5.1.1. Le pilotage par l'amont (production à flux poussé / push system)	18
1.5.1.2. Le pilotage par l'aval (production à flux tirés / pull system)	19
1.5.2. Outils de gestion de la production.....	19
1.5.2.1. Planification des ressources d'entreprise (ERP)	20
1.5.2.2. Management des ressources de production (MRP).....	21
1.5.2.3. Système de gestion de la production (MES).....	23
1.5.2.4. Kanban.....	24
1.5.2.5. Gantt Project.....	25
Section 2 : Les processus pharmaceutiques.....	26
2.1. Introduction à l'industrie pharmaceutique.....	26
2.1.1. Les ateliers de production.....	28
2.1.2. Les laboratoires de contrôle qualité.....	29
2.2. Concepts liés aux médicaments.....	30
2.2.1. Définition du médicament.....	31
2.2.2. Composition des médicaments.....	31
2.2.2.1. Le principe actif.....	31
2.2.2.2. L'excipient.....	32
2.2.3. Origine des médicaments.....	33
2.2.3.1. Médicaments d'origine végétale	33
2.2.3.2. Médicaments d'origine animale.....	34
2.2.3.3. Médicaments d'origine microbiologique.....	34
2.2.3.4. Médicaments d'origine minérale.....	35
2.2.3.5. Médicaments d'origine biotechnologique.....	35
2.2.4. Formes pharmaceutiques et voies d'administration.....	36
2.3. Généralités sur les formes pharmaceutiques solides.....	37
2.3.1. Principes actifs de la forme solide.....	37
2.3.2. Excipients de la forme solide.....	38
2.3.3. Types de formes pharmaceutiques solides.....	39
2.3.4. Le comprimé : forme pharmaceutique solide majeure.....	40
2.3.4.1. Types de comprimés.....	40
2.3.4.2. Avantages.....	41

2.4. Fabrication d'un médicament sous forme de comprimé.....	42
2.4.1. Étapes du procédé de fabrication.....	42
2.4.1.1. Étape 1 : Préparation des matières premières.....	43
2.4.1.2. Étape 2 : Mélange et/ou granulation.....	44
2.4.1.3. Étape 3 : Compression.....	46
2.4.1.4. Étape 4 : Conditionnement.....	48
2.4.2. Contraintes réglementaires et qualité pharmaceutique.....	48
2.4.2.1. Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF).....	49
2.4.2.2. Aspect réglementaire.....	50
Conclusion	51

Chapitre 2 : L'Industrie 4.0 et l'Internet des Objets dans la production industrielle.....

Introduction.....	53
Section 1 : Fondements, évolution et piliers technologiques de l'Industrie 4.0	54
1.1. Origine et évolution du concept d'industrie	54
1.2. Évolution des révolutions industrielles.....	56
1.2.1. Industrie 1.0 : La Mécanisation.....	57
1.2.2. Industrie 2.0 : L'Électrification.....	58
1.2.3. Industrie 3.0 : L'Automatisation et La Mondialisation.....	58
1.2.4. Industrie 4.0 : La Numérisation.....	58
1.2.5. Industrie 5.0 : L'Interaction homme-machine.....	59
1.3. Introduction à l'industrie 4.0.....	61
1.3.1. Définition et concept général.....	62
1.3.2. Contexte et origine de l'Industrie 4.0.....	62
1.4. Les principes fondamentaux de l'Industrie 4.0.....	64
1.4.1. Interopérabilité.....	64
1.4.2. Transparence de l'information.....	65
1.4.3. Assistance technique.....	65
1.4.4. Décentralisation des décisions.....	66
1.5. Les piliers technologiques de l'Industrie 4.0.....	67
1.5.1. L'Intelligence Artificielle (IA) et le Machine Learning (ML).....	67

1.5.1.1. L'Intelligence Artificielle (IA).....	67
1.5.1.2. Le Machine Learning (ML).....	68
1.5.2. L'Infonuagique (Cloud Computing)	68
1.5.3. Les Systèmes Cyber-Physiques (Cyber-Physical Systems, CPS)	69
1.5.4. Les données massives (Big Data) et leur analyse.....	69
1.5.5. L'Internet des objets (IoT).....	70
1.5.6. Les Machines Autonomes (Robots).....	70
1.5.7. La communication inter machines (Machine-to-Machine, M2M)	71
1.5.8. La cybersécurité.....	71
1.5.9. La simulation.....	72
1.5.10. La réalité augmentée.....	72
Section 2 : L'Internet des Objets comme levier d'optimisation des processus de production.....	73
2.1. Introduction à l'Internet des Objets	73
2.1.1. Définition générale de l'IoT.....	73
2.1.2. Définition d'un objet connecté	75
2.1.2.1. Principales caractéristiques des objets connectés.....	75
2.1.2.2. Distinctions techniques par rapport aux équipements traditionnels.....	75
2.1.3. Définition du terme M2M (Machine to Machine)	77
2.1.3.1. Principe de fonctionnement du M2M.....	77
2.1.3.2. Domaines d'application du M2M.....	78
2.1.3.3. Comparaison entre M2M et IoT.....	79
2.2. L'IoT dans l'industrie : un catalyseur de transformation.....	79
2.2.1. Évolution et adoption de l'IoT dans l'industrie.....	80
2.2.2. Différence avec d'autres technologies industrielles.....	81
2.3. Formes d'application de l'Internet des objets (IoT)	81
2.3.1. Ville intelligente (Smart City)	82
2.3.2. Réseaux intelligents (Smart Grids)	83
2.3.3. Réseau industriel intelligent (Smart Manufacturing)	83
2.3.4. Réseau de santé intelligent (Smart Healthcare)	84
2.4. L'intégration d'un système IoT.....	85

2.4.1. Le modèle de référence de l'IoT.....	86
2.4.2. Les normes et standards de communication.....	88
2.4.2.1. La norme IEEE 802.11.....	88
2.4.2.2. La norme IEEE 802.15.15.....	88
2.4.2.3. La norme IEEE 802.15.4.....	89
2.4.3. Les technologies de l'IoT.....	89
2.4.3.1. NFC (Near Field Communication)	89
2.4.3.2. Bluetooth.....	90
2.4.3.3. Wi-Fi.....	90
2.4.4. Les limites de l'intégration de l'IoT.....	90
2.4.4.1. Coût d'investissement élevé.....	91
2.4.4.2. Pannes de connectivité.....	91
2.4.4.3. Combiner l'infrastructure héritée et l'infrastructure IoT.....	91
Conclusion	92

Partie 2 : Traitement de la problématique

Chapitre 3 : Environnement professionnel et état de l'art	93
Introduction.....	94
Section 1 : Présentation de l'organisme d'accueil	95
1.1. Aperçu du secteur pharmaceutique en Algérie.....	95
1.1.1. Caractéristiques de l'industrie pharmaceutique en Algérie.....	96
1.1.1.1. Mise en œuvre des accords ADPIC.....	96
1.1.1.2. L'exigence des investissements élevés et des technologies avancées.....	96
1.1.1.3. Dépendance à la spécialisation et à l'expertise accumulées au fil des années....	96
1.1.1.4. Produits sur le marché local.....	96
1.1.2. Vue d'ensemble du marché pharmaceutique en Algérie.....	97
1.1.3. Concurrents dans le secteur de l'industrie pharmaceutique en Algérie.....	98
1.1.3.1. Les laboratoires pharmaceutiques présents en Algérie.....	98
1.1.3.2. Classement des principaux producteurs pharmaceutiques en Algérie.....	102
1.2. L'entreprise Ms Pharma.....	103
1.2.1. Les valeurs de Ms Pharma	105
1.2.2. La mission de Ms Pharma.....	106

1.2.3. La vision de Ms Pharma.....	106
1.3. Présentation de l'entreprise El Kendi.....	106
1.3.1. Historique de l'entreprise.....	107
1.3.2. L'activité de l'entreprise.....	108
1.3.3. La fiche technique.....	110
1.3.4. Départements d'El Kendi.....	111
1.4. La fonction de production au sein de l'entreprise El Kendi.....	113
1.4.1. La stratégie de production	113
1.4.2. Les objectifs de l'activité productive.....	114
1.4.2.1. Objectif en termes de quantités produites.....	114
1.4.2.2. Objectif en termes de qualité.....	114
1.4.2.3. Objectif en termes de coûts.....	114
1.4.3. Formes de numérisation au sein de la fonction de production.....	115
1.4.3.1. Les logiciels utilisés	116
1.4.3.2. L'Internet des objets (IoT).....	117
Section 2 : Revue de la littérature et travaux connexes	118
2.1. Sécurité et fiabilité dans l'IoT industriel.....	119
2.2. Contrôle avancé et optimisation des processus.....	121
2.3. Modernisation et automatisation d'équipements industriels.....	122
Conclusion.....	123
Chapitre 4 : Méthodologie de la recherche et analyse des résultats	124
Introduction.....	125
Section 1 : Méthodologie de la recherche	126
1.1. Référentiel méthodologique de l'étude.....	126
1.1.1. Définitions terminologiques.....	126
1.1.1.1. L'enquête	126
1.1.1.2. L'enquête qualitative.....	126
1.1.1.3. L'entretien.....	127
1.1.1.4. Les types d'entretiens.....	127
1.2. L'objectif de la recherche.....	127

1.3. La réalisation de l'étude.....	128
1.3.1. Méthode d'étude.....	128
1.3.2. Cadre d'analyse thématique.....	129
1.3.3. Moyen d'étude.....	129
1.3.4. L'échantillonnage.....	130
1.3.5. Le protocole de guide d'entretien.....	130
Section 2 : Présentation et analyse des résultats	132
2.1. Analyse des résultats de l'enquête.....	132
2.1.1. Résumé des réponses obtenues.....	132
2.1.2. Synthèse des entretiens.....	138
2.2. Suggestions et recommandations.....	140
2.3. Capteurs IoT en production.....	142
Conclusion.....	143
Conclusion générale.....	144
Références bibliographiques	
Annexes	