



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة – عنابة

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE – ANNABA

Département Génie Industriel

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Management Industriel

Présenté par

AMINA SOUAMES

HALIMA HALIMI

DEVELOPPEMENT D'UNE POLITIQUE DE GESTION DE FLUX TIRE BASEE SUR LA METHODE KANBAN : CAS D'ETUDE EN- TREPRISE FERTIAL ANNABA

Encadré par

Dr. Imen Driss

ENSTI Annaba

Co-encadré par

Dr. Mohamed DJEMANA

ENSTI Annaba

Membres du jury :

Pr. Messaoud DJEGHABA

Président

ENSTI-Annaba

Dr. Tarek Kebabssa

Examineur

ENSTI-Annaba

Dr. Youcef ABIDI

Examineur

ENSTI-Annaba

Année 2025

Remerciement

Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout-puissant, de nous avoir donné la force, la capacité et la guidance pour accomplir ce travail de recherche.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos chers parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et les sacrifices endurés.

Ainsi, nous tenons à remercier notre encadrante Mme «< DRISS Imane >>, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies et d'Ingénieurs, pour ses précieux conseils, ses compétences scientifiques et sa qualité humaine, et qu'il était toujours disponible avec ses encouragements.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements au ingénieurs et toute l'équipe de L'entreprise de Fertial notamment ceux de l'unité NPK, pour leurs disponibilité, leurs aide précieuse et leurs conseils durant notre stage pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude et nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

À mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs, je dédie ce mémoire en reconnaissance de votre soutien constant et de votre amour inconditionnel. Votre présence bienveillante a été la force motrice derrière mes accomplissements et ma détermination à réussir. Votre soutien inébranlable, vos encouragements incessants et votre confiance en moi ont été les fondements de ma réussite. Vous êtes ma source d'inspiration et mes piliers, et je vous suis infiniment reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Résumé

Ce travail étudie l'amélioration de la gestion des flux de production chez Fertial Annaba (Algérie) via la méthode Kanban. L'entreprise productrice d'engrais NPK, souffre de surproduction et de stocks excessifs. Qui nuisent à l'efficacité de sa chaîne de production.

L'étude commence par une analyse des processus de production afin d'identifier la machine critique ou le goulot d'étranglement qui engendre des retards en raison de vitesse par rapports aux machines non goulots dans le processus de fabrication. Ensuite, la méthode Kanban a été implémentée. Elle repose sur le calcul des paramètres essentiels (nombre de cartes, seuils de déclenchement, etc.) et la mise en œuvre d'un plan d'action concret. L'application du Kanban a permis une harmonisation entre les machines, la réduction significative des en cours stocks et une meilleure adaptation à la demande réelle.

Les résultats ont été validés à travers le calcul d'indicateurs de performance, ainsi qu'une étude comparative entre le modèle traditionnelle et le modèle basé sur Kanban. Enfin, le mémoire se termine par des perspectives d'amélioration et des recommandations pour une gestion plus efficace et durable des flux de production.

Mots clé : Gestion des flux de production, Méthode Kanban, Flux tiré ,Juste-à-temps (JAT), Optimisation des stocks, Goulot d'étranglement

Abstract

This thesis studies the improvement of production flow management at Fertial Annaba (Algeria) through the Kanban method. The company, which produces NPK fertilizers, suffers from overproduction and excessive inventory, which hinder the efficiency of its production line.

The study begins with an analysis of production processes to identify the machine recognized as the bottleneck, which causes delays due to a high level of work-in-progress.

Based on this analysis, the Kanban method was implemented. It relies on calculating key parameters (number of cards, trigger thresholds, etc.) and applying a concrete action plan. The application of Kanban led to a significant reduction in inventory and better alignment with actual demand.

The results were validated through the calculation of performance indicators and a comparative study between the initial model and the Kanban-based model. Finally, the thesis con-

cludes with improvement perspectives and recommendations for more efficient and sustainable flow management.

Key words ; Production flow management , Kanban method ,Pull flow, Just-in-time (JIT),Stock optimization, Bottleneck

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة تحسين إدارة تدفقات الإنتاج في شركة فرتيال عناية (الجزائر) من خلال منهجية كانبان تعاني الشركة المنتجة للأسمدة NPK، من فرط الإنتاج وتراكم المخزون، مما يؤثر سلباً على كفاءة سلسلة الإنتاج. بدأت الدراسة بتحليل العمليات الإنتاجية لتحديد الآلة التي تم التعرف عليها والتي تتسبب في تأخيرات بسبب ارتفاع مستوى المنتجات قيد الإنجاز.

بناءً على هذا التحليل، تم تنفيذ منهجية كانبان، والتي تعتمد على حساب المعلمات الأساسية (عدد البطاقات، حدود التنفيع، وغيرها) وتطبيق خطة عمل ملموسة. وقد أدى تطبيق هذه المنهجية إلى تقليص كبير في المخزون وتحسين التكيف مع الطلب الفعلي.

تم التحقق من النتائج من خلال حساب مؤشرات الأداء، بالإضافة إلى دراسة مقارنة بين النموذج الأولي والنموذج القائم

عنق الزجاجة على كانبان. وتختتم المذكرة بتقديم آفاق تحسين وتوصيات من أجل إدارة أكثر كفاءة واستدامة لتدفقات الإنتاج

الكلمات المفتاحية : إدارة تدفق الإنتاج , طريقة كانبان , التدفق السحبي (الطلب) في الوقت المناسب, تحسين المخزون عنق الزجاجة.

Sommaire

Remerciements.

Dédicace.

Résumé.

Liste des abréviations.

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Introduction générale.....1

Chapitre 01 : Description de l'entreprise Du stage, motivation et problématique.....2

Introduction.....3

1.1 Présentation de l'entreprise..... 3

1.2 Historique.....3

1.3 Situation géographique.....3

1.4 Fiche signalétique de l'entreprise.....4

1.5 Organisation interne.....5

1.6 Activités des unités au niveau FERTIAL.....5

1.7 Problématique et motivation6

Conclusion

Chapitre 02 : Etat de l'art.....7

Introduction.....8

2.1 Contexte de la production des engrais NPK.....8

2.2 La méthode Kanban.....9

2.2.1 Définition.....9

2.2.2 le flux tiré.....9

2.2.3 Le nombre de Kanban.....9

2.3 La mise en œuvre antérieure de Kanban dans les industries manufacturières.....10

Conclusion.....10

Chapitre 03 : Présentation du processus de production NPK chez FERTIAL.....12

Introduction.....13

3.1 Présentation de l'unité de production.....13

3.1.1 Préparation de la matière première.....14

3.1.2 Préparation de la bouillie.....14

3.1.3 Granulation.....14

3.1.4 Séchage de produit.....	15
3.1.5 Classification et broyage du produit.....	15
3.1.6 Refroidissement de produit.....	16
3.1.7 Enrobage du produit.....	16
3.1.8 Assainissement et lavage des gaz.....	17
Conclusion.....	17
<u>Chapitre 4 : Application de la méthode Kanban.....</u>	18
Introduction.....	19
4.1 Définitions.....	19
4.2 Gammes de fabrication des engrais NPK.....	19
4.3 Méthodologie.....	20
4.4 Application de la méthode.....	21
4.5 Résultats et Discussions.....	25
4.5.1 Les attendus de l'implémentation Kanban.....	25
4.5.2 Validation et Mesure du Succès (KPIs proposés).....	25
4.6 Comparaison entre le model existant et le model Kanban.....	26
4.7 Observations et recommandation.....	27
Conclusion.....	27
Conclusion générale.....	28
Bibliographie.....	29

Liste des tableaux :

Tableau 1.1: l'historique du complexe d'engrais FERTIAL et l'évolution de la société AS-MIDAL.

Tableau 4.1: les Unités de production du complexe d'engrais Fertil

Tableau 4.1: Gammes de fabrication Sulfazote

Tableau 4.1: Gammes de fabrication NPKs

Tableau 4.3: Tableau de Kanban

Liste des figures :

Figure 1.1: Situation géographique du complexe fertial.

Figure 2.1: Principe de fabrication des engrais NPK.

Figure 3.1 : Diagramme général de l'unité.

Figure 3.2 : Schématisation de la section des cuves d'attaque.

Figure 3.3 : Schématisation de la section de granulation.

Figure 3.4 : Schématisation de la section séchage.

Figure 3.5 : Schématisation de l'opération classification et recyclage.

Figure 3.6 : Schématisation de la section d'enrobage.

Introduction générale

L'approche de production développée par l'école Toyota, fondée sur le Juste-à-temps (JIT) et le Kanban, a profondément transformé la gestion des flux industriels. Contrairement au système poussé basé sur le MRP, qui produit selon des prévisions, le flux tiré ne déclenche la production qu'en fonction de la demande réelle. Cette méthode vise principalement à réduire les stocks, limiter les en-cours et améliorer la réactivité. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, en explorant l'application de la méthode Kanban chez Fertial Annaba.

Dans ce contexte, la gestion optimale des flux de production est un enjeu majeur pour améliorer la productivité, cette étude vise à démontrer comment l'adoption d'une gestion en flux tiré, via la méthode Kanban, peut contribuer à l'amélioration continue des performances industrielles de FERTIAL, tout en s'inscrivant dans une démarche d'excellence opérationnelle.

Cette étude a pour objectif principal de présenter la conception et la planification d'un système de production basé sur la méthode KANBAN, en définissant ses principaux paramètres (nombre de Kanban, limite d'engagement « LE », limite de sécurité « LS », etc.), dans le but de mettre en place une stratégie efficace de gestion en flux tiré.

Ce mémoire est constitué en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Présentation de Fertial Annaba, de son historique, de son organisation et des défis auxquels elle est confrontée.

Chapitre 2 : Revue des concepts théoriques liés à la méthode Kanban et aux systèmes de production des engrais NPK.

Chapitre 3 : Description de Processus de production chez Fertial

Chapitre 4 : Proposition concrète pour l'implémentation du système Kanban, incluant des calculs et une étude comparative entre le système actuel et ce qui est amélioré par kanban.

Le mémoire se termine par une conclusion générale qui récapitule les apports de l'étude.

Chapitre 01 :

Description de l'entreprise
du stage, motivation, et
problématique

Introduction :

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'études en Master de Management Industriel, nous avons choisi d'effectuer notre stage au sein de l'entreprise Fertial Annaba, active dans le secteur des engrais chimiques. Notre projet porte sur l'amélioration de la gestion des flux tirée par l'implémentation de Kanban. Ce chapitre donne une vision générale sur l'entreprise Fertial Annaba : présentation, historique, organisation et des défis auxquels elle est confrontée.

1.1 Présentation de l'entreprise :

Fertial est une entreprise algérienne spécialisée dans les fertilisants, constituée sous forme de société par actions (SPA) et détenue à 100 % par le groupe ASMIDAL. Avec un capital social de 17,697 milliards de dinars, elle est implantée sur deux sites industriels situés à Annaba et Arzew. Sa capacité annuelle de production atteint un million de tonnes d'ammoniac, dont une partie est utilisée pour fabriquer une large gamme d'engrais azotés et phosphatés, principalement destinée à répondre aux besoins du secteur agricole national. En parallèle, Fertial exporte également une partie de sa production vers divers marchés internationaux.[1]

1.2 Historique :

Le développement du complexe d'engrais d'Annaba et de la société ASMIDAL passent par les phases suivantes :

Tableau 1.1 : l'historique du complexe d'engrais FERTIAL et l'évolution de la société ASMIDAL.[2]

Date	Description
1972	Construction du complexe d'engrais d'Annaba par SONATRACH pour couvrir les besoins nationaux et exporter l'excédent
1985	Création d'ASMIDAL après restructuration de SONATRACH, pour gérer la production et la commercialisation d'engrais.
1997	Plan de restructuration d'ASMIDAL avec décision de filialiser les unités d'Annaba et Arzew.
2000	Naissance des filiales : Fertial (Annaba) et Alzofert (Arzew).
2005	Partenariat signé entre ASMIDAL et le groupe espagnol Vilar Mir, qui obtient 66% des parts dans les deux sites.
2017	Rattachement d'ASMIDAL, ses filiales et FERTIAL au groupe SONATRACH (ministère de l'Énergie), décision CPE n° 12/154.

1.3 Situation géographique :

L'usine est implantée à environ 4 kilomètres à l'est de la ville d'Annaba. Elle est délimitée par l'Oued Seybouse et le quartier Sidi Salem à l'est, par la cité Seybouse à l'ouest, par la mer Méditerranée au nord, et par la route nationale n°44 ainsi que la plaine d'Annaba au sud.[3]



Figure 1.2 : Situation géographique du complexe FERTIAL-Annaba

1.4 Organisation de l'entreprise :

Le site industriel est structuré en deux principales zones de production :

Zone Sud – Engrais phosphatés

Cette zone, dédiée à la fabrication d'engrais phosphatés. Elle regroupe les ateliers suivants :

- Atelier NPK : production d'engrais composés.
- Atelier SSP : fabrication de super phosphate simple.
- Atelier UAN : production d'engrais liquides à base d'urée et de nitrate d'ammonium.

Zone Nord – Engrais azotés

Spécialisée dans les engrais azotés. Elle comprend les unités suivantes :

- Unité de production d'ammoniac (NH_3).
- Centrales utilité I et II (fourniture d'énergie et de services industriels).
- Unité d'acide nitrique (HNO_3).
- Unité de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3).
- Installations de manutention et de stockage pour les produits finis et intermédiaires.[3]

1.5 Activités des unités au niveau FERTIAL : Ce tableau présente les différentes unités de Fertial et ses différentes capacités.

Tableau 1.2 : Les Unités de production du complexe d'engrais Fertial.[3]

Unité	Produit Principal	Capacité
Ammoniac (NH₃)	Ammoniac liquide anhydre (99% pur)	330000 t/ ans
Acide nitrique	Acide nitrique concentré (57%)	800 t/j
SSP	Superphosphate simple liquide (SSP)	800 t/j
NPK	Engrais composé (NPK)	1050 t/j
Centrale utilités	Électricité, eau dessalée/déminéralisée, vapeur	/
Nitrate d'ammonium	Nitrate d'ammonium liquide et solide	500 t/j

1.6 Objectifs de l'entreprise :

L'entreprise ambitionne de jouer un rôle moteur dans le développement du secteur des engrais, en mettant à profit ses ressources humaines, techniques et financières. Elle s'engage à répondre aux besoins du marché agricole en produits fertilisants, à renforcer ses relations avec divers partenaires pour assurer une production continue[3], et à encourager l'innovation ainsi que l'initiative locale, en valorisant les compétences et les moyens disponibles sur le territoire.[5]

1.7 Problématique et Motivation :

L'entreprise Fertial fait souvent face à des défis majeurs liés à La production excessive engendre une accumulation de stocks non nécessaires, ce qui génère des coûts additionnels pour l'entreprise, des gaspillages de ressources et une rigidité des processus. Dans ce contexte, la méthode Kanban, fondée sur un principe de flux tiré, se présente comme une solution pour aligner la production sur la consommation réelle, minimisant ainsi les excès. Cependant, son implémentation soulève les questions :

- Comment la méthode Kanban peut-elle optimiser la gestion des flux de production chez Fertial Annaba pour réduire les stocks, améliorer la réactivité et minimiser les coûts ?
- Quels mécanismes Kanban (cartes, seuils de réapprovisionnement, boucles de contrôle) permettent de réduire significativement les stocks inutiles ?

Le choix de cette étude repose sur deux axes complémentaires : d'une part, un axe subjectif, motivé par notre intérêt personnel pour les méthodes Lean, notamment le Kanban, et le désir de mettre en pratique ces concepts mais rigoureux dans un contexte réel comme celui de Fertial Annaba ; d'autre part, un axe académique, qui consiste à analyser l'application concrète de la

méthode Kanban, issue de l'approche Lean, comme un instrument efficace d'optimisation des flux de production et de réduction des gaspillages.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de dresser un aperçu global de l'environnement dans lequel s'inscrit ce stage, à savoir l'EPS, en mettant en lumière son organisation, son secteur d'activité, ainsi que ses principales missions. Cette contextualisation a ensuite conduit à l'identification d'une problématique concrète rencontrée sur le terrain, révélant les enjeux réels auxquels l'entreprise est confrontée. La mise en évidence de cette problématique a naturellement orienté la réflexion vers un sujet pertinent et motivant, à la fois en phase avec les besoins de l'entreprise et avec mes objectifs d'apprentissage. Ainsi, cette étude s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue, nourrie par une volonté d'apporter une contribution pratique et ciblée tout en consolidant mes compétences professionnelles.

Chapitre 02 :

Etat de l'art

Introduction :

Le terme engrais complet désigne généralement des formulations contenant les trois éléments nutritifs essentiels : l'azote, le phosphore et le potassium. Les concentrations de ces éléments sont exprimées en kilogrammes de nutriments par kilogramme d'engrais, à l'exception du phosphore et du potassium, dont les teneurs sont indiquées respectivement sous forme de pentoxyde de phosphore (P_2O_5) et d'oxyde de potassium (K_2O). Les engrais ternaires (de type NPK) peuvent être élaborés à partir de différentes sources de nutriments majeurs et selon divers procédés de fabrication. Il en résulte une grande diversité de formulations possibles.

Il existe plusieurs teneurs en N.P.K à savoir :

- N.P.K (15.15.15).
- N.P.K (15.9.22).
- N.P.K (12.12.17).
- Sulfazote.[6]

Dans ce chapitre on s'intéressera à des bases théoriques et les travaux antérieurs liés à la gestion de la production dans l'industrie des engrais, en mettant l'accent sur la méthode d'amélioration basé "Kanban". Cette littérature permet de positionner notre étude dans un contexte académique et professionnel pertinent.

2.1 Contexte de la production des engrais NPK :

Les engrais NPK sont des fertilisants minéraux essentiels pour le développement des plantes. Le sigle NPK représente les trois éléments nutritifs de base nécessaires à la croissance des cultures :

- L'azote (N) contribue principalement au développement des parties aériennes de la plante, notamment les feuilles et les tiges.
- Le phosphore (P) joue un rôle essentiel dans le renforcement du système racinaire et favorise la floraison.
- Le potassium (K) augmente la résistance des plantes face aux maladies et améliore la qualité des fruits produits.

Leur fabrication passe par :

- Dosage et mélange des matières premières (azote, phosphate, potasse).
- Granulation : agglomération du mélange sous forme de granulés.
- Séchage : pour retirer l'humidité.
- Refroidissement et tamisage : pour calibrer les granulés.
- Conditionnement : mise en sacs, big-bags ou vrac.
- Stockage en attente de distribution.

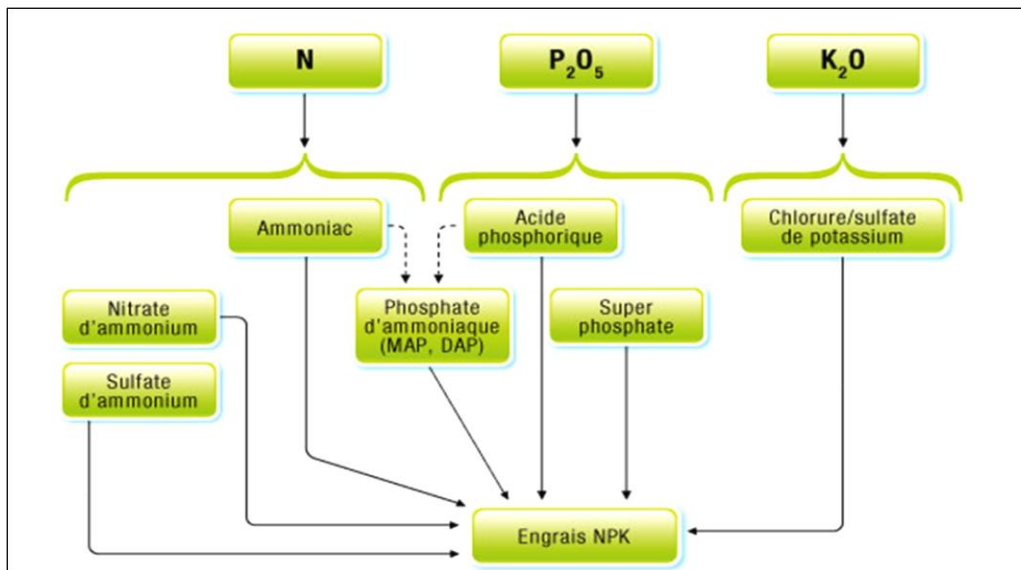


Figure 2.1: Principe de fabrication des engrais NPK.[7]

La production des engrais NPK fait face à divers dysfonctionnements techniques et organisationnels (des arrêts de machines, des retards d'approvisionnement, une mauvaise organisation) affectant la qualité et l'efficacité. Kanban permet de résoudre ces problèmes et d'améliorer la gestion des flux de production.

2.2 Méthode Kanban :

2.2.1 Définition :

Le terme Kanban, d'origine japonaise, signifie « carte » ou « étiquette ». Ce système a été développé dans les usines du constructeur automobile Toyota afin de garantir un flux continu et harmonieux des produits tout au long de la chaîne de production. Initialement conçu pour répondre aux exigences du juste-à-temps, il a évolué pour devenir un véritable outil de pilotage de la production. Le Kanban repose sur une logique de flux tiré et agit également comme un système d'information, permettant de visualiser, contrôler et ajuster les quantités produites à chaque étape du processus industriel. [8]

2.2.2 Le flux tiré :

Le flux tiré est une approche organisationnelle où la production n'est lancée qu'en réponse à une demande concrète du client. Directement inspiré du Lean Management, ce mode de fonctionnement vise à synchroniser les activités de l'entreprise avec les besoins réels du marché. Il permet ainsi d'ajuster la planification et l'ordonnancement des opérations, tout en limitant les excès de production et en améliorant l'efficacité globale des processus.[9]

2.2.3 Le nombre Kanban :

La détermination du nombre optimal de cartes Kanban est essentielle pour équilibrer efficacité et performance dans un système de production. Un nombre trop élevé évite les ruptures de stock

mais génère des encours importants, tandis qu'un nombre insuffisant réduit les stocks mais augmente les risques de pénurie. L'objectif est donc de trouver le juste milieu entre niveau de stock et qualité de service. Cependant, plutôt que de se limiter à un calcul théorique, il est crucial d'améliorer en continu le système de production pour minimiser le nombre de Kanban nécessaire. Cela passe par :

- Une évaluation coût-bénéfice des conséquences liées aux ruptures de stock.
- La diminution des temps de changement d'outils ainsi que la mise en place de productions en petits lots.
- L'optimisation des délais de fabrication et des transports entre les différentes étapes

Ces mesures permettent de fluidifier les flux et de rendre le système plus réactif, tout en maintenant un niveau de stock minimal sans compromettre la satisfaction client. [8]

2.3 Mise en œuvre de la méthode :

Un travail d'étude de gestion de processus soutenue par kanban a été mis en œuvre dans une entreprise industrielle visant une amélioration significative de sa productivité grâce à la réduction des durées de cycle de production, tout en contrôlant les coûts et en maîtrisant les imprévus.[10]. Application du Kanban dans une usine pharmaceutique indienne pour : Synchroniser la production entre les départements, Réduire les stocks intermédiaires de 40%, Améliorer le taux de service client de 85% à 97% [11]. Une autre étude de cas présente l'implémentation du système Kanban Jidoka, une solution numérique de réapprovisionnement intelligent, pour résoudre les problèmes d'approvisionnement sur une ligne de production de composants automobiles. La mise en œuvre de ce système a conduit à une réduction de 91,2 % des arrêts de ligne, une baisse de 57 % des stocks de matériaux en cours, ainsi qu'un retour sur investissement obtenu en moins de trois mois.[12]

Application du Kanban dans une usine mexicaine de circuits imprimés confrontée à des goulots d'étranglement et à une surproduction chronique. Implémentation d'un système Kanban hybride (physique et numérique), utilisation de cartes électroniques avec codes QR pour le suivi en temps réel, Intégration avec le système MES (Manufacturing Execution System) existant Dans le but d'atteindre :

- Une réduction de 45 % des encours grâce à un contrôle visuel efficace des flux,
- Une amélioration de la traçabilité des composants sensibles,
- Une standardisation des tailles de lots optimisées pour les composants montés en surface (SMD).[14]

Conclusion :

Le système Kanban apporte des avantages importants, notamment en réduisant les stocks et en améliorant la fluidité des flux, il comporte néanmoins certaines contraintes. Son efficacité repose sur une demande stable et prévisible ; dans des contextes de forte variabilité (ex. fluctuations saisonnières des commandes d'engrais), Kanban peut entraîner des ruptures de stock ou des surproductions localisées [15]. De plus, son implémentation nécessite une rigueur organisationnelle (ex. synchronisation parfaite entre postes) et une adhésion totale des équipes, ce qui peut constituer un défi dans les environnements industriels traditionnels [16].

Des alternatives comme le MRP (Material Requirements Planning, flux poussé) pourraient être envisagées pour les produits à longue durée de cycle ou aux demandes irrégulières. Le MRP, basé sur des prévisions plutôt que sur la consommation réelle, permet une planification centralisée mais au risque d'accumuler des stocks intermédiaires [17]. Une solution hybride (Kanban pour les lignes stables + MRP pour les produits spéciaux) a d'ailleurs été testée avec succès dans l'industrie chimique mexicaine, réduisant les encours de 25 % tout en maintenant un taux de service client à 95 % [17].

Enfin, des études récentes soulignent que la digitalisation des Kanbans (ex. cartes électroniques avec QR codes) améliore leur adaptabilité aux environnements complexes, comme le montre l'usine brésilienne de composants aéronautiques [18]. Ferial pourrait explorer cette piste pour moderniser son système de gestion des flux.

Chapitre 03 :

Présentation du proces-
sus de production NPK
chez FERTIAL.

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons en détail le procédé de fabrication des engrais NPK (3×15) ainsi que les équipements impliqués, depuis la réception des matières premières jusqu'à l'étape finale de stockage. [3]

3.1 Présentation de l'unité de production des engrais NPK :

Notre étude est réalisée au sein de l'unité NPK qui est présentée dans la figure 3.1

L'unité de production d'engrais contient 7 sections principales :

1. Préparation des matières premières.
2. Préparation de la bouillie.
3. Granulation.
4. Séchage du produit.
5. Classification et broyage du produit.
6. Refroidissement du produit.
7. Enrobage du produit.
8. Traitement et lavage des gaz.

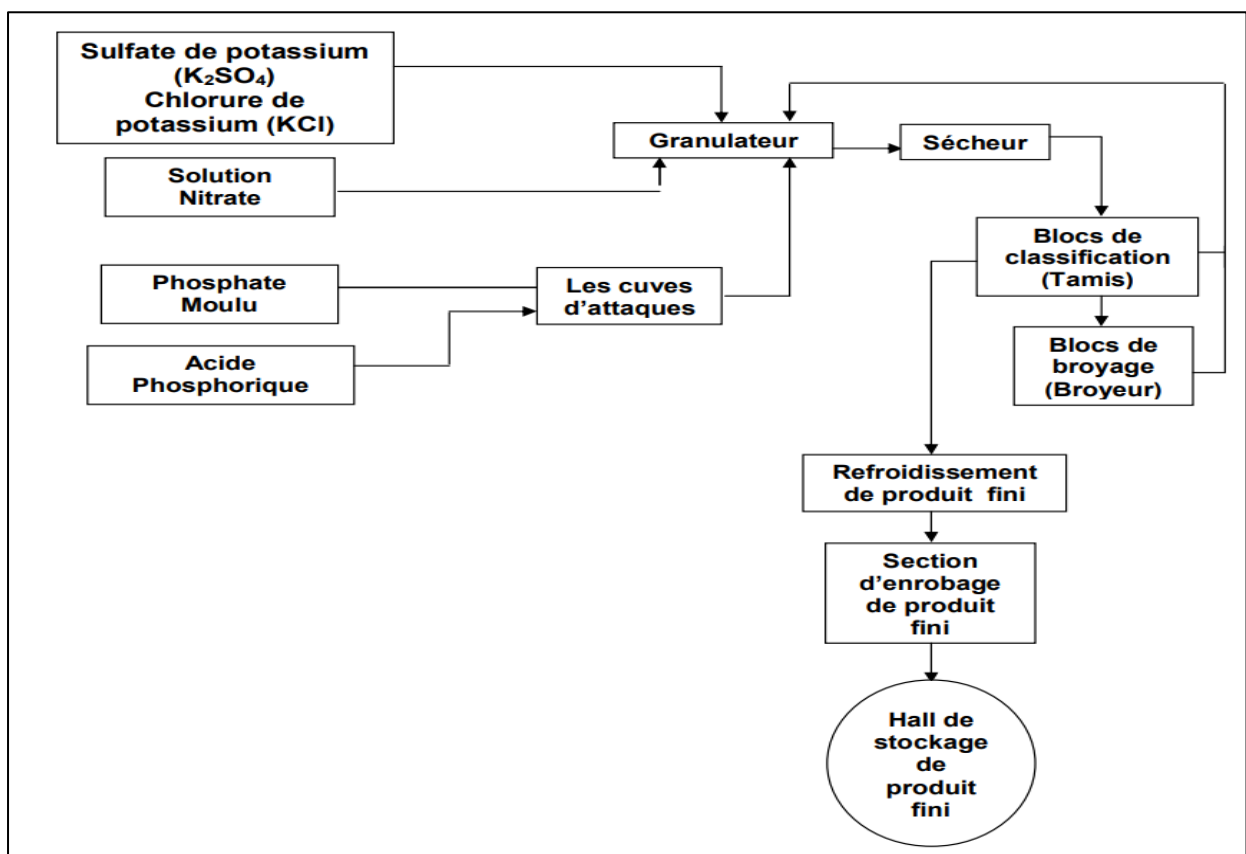


Figure 3.1 : Diagramme général de l'unité.

3.1.1 Préparation des matières première :

Afin de préparer les matières premières pour les engrais NPK (3*15) on utilise cinq composants

principaux :

Le phosphate broyé (80-95% sous 160 microns) stocké dans des silos de 1200 tonnes, la potasse (K_2SO_4 ou KCl) sélectionnée selon sa teneur en K_2O . L'acide phosphorique dilué à 42% ou 40% selon le produit final. La solution nitrate à 92% (sauf pour certaines formulations), et l'ammoniac utilisé sous forme gazeuse ou liquide pour contrôler le pH entre 4.5 et 4.8.

Chaque matière première fait l'objet de contrôles stricts de concentration, granulométrie et pH avant son incorporation dans le processus de production, garantissant ainsi la qualité et l'efficacité des réactions chimiques ultérieures.

3.1.2 Préparation de la bouillie :

Dans la cuve d'attaque primaire, un mélange initial est réalisé entre l'acide phosphorique et le phosphate broyé. Ce mélange déclenche une réaction chimique où le phosphate réagit avec l'acide phosphorique pour former les premiers éléments nécessaires à la fabrication de l'engrais. Afin d'assurer une réaction efficace et complète, il est indispensable de maintenir la température dans la cuve entre 90 °C et 110 °C.

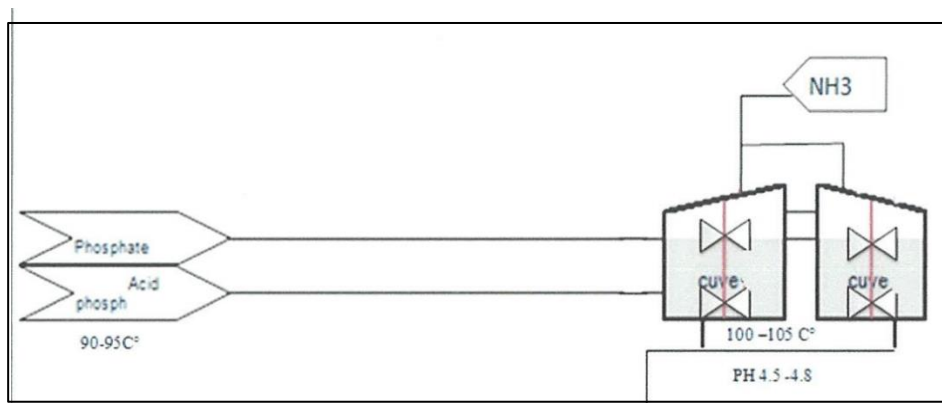


Figure 3.2 : Schématisation de la section des cuves d'attaque.

3.1.3 Granulation :

Le mélange provenant de la deuxième cuve est transféré sans risque de bouchage vers un tambour granulateur, où elle est mélangée avec du produit recyclé, du nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) et du sulfate de potassium (K_2SO_4). Le tambour, conçu pour permettre un bon contrôle du processus, assure la granulation. Les gaz générés sont aspirés et lavés.

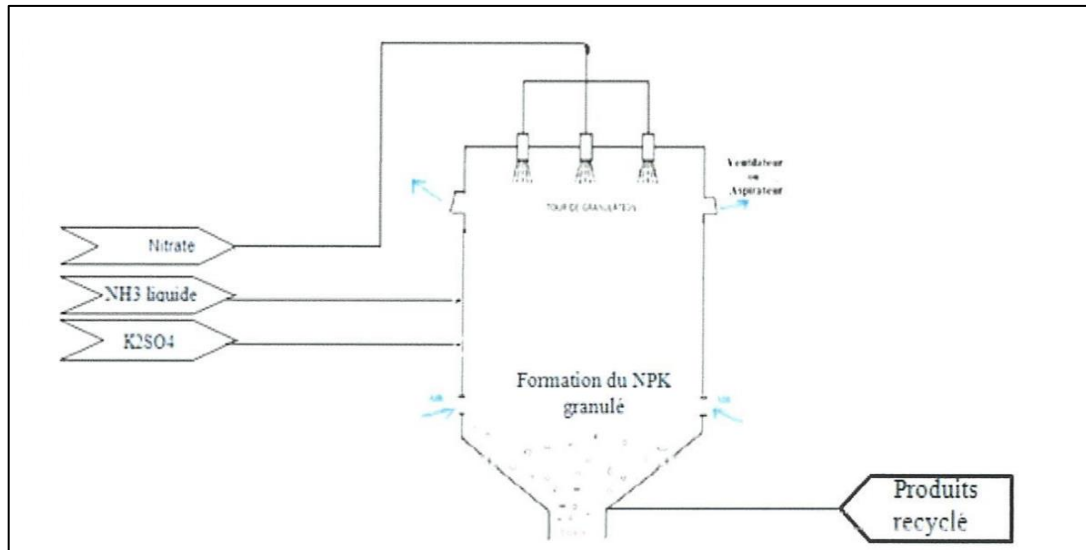


Figure 3.3 : Schématisation de la section de granulation.

3.1.4 Séchage du produit :

Le produit issu du granulateur, encore humide, doit être séché pour augmenter sa concentration, éviter le colmatage au stockage et améliorer sa résistance mécanique. Les granulés passent environ 30 minutes dans un tube rotatif quasi horizontal, traversé par un courant d'air chaud généré par la combustion de gaz naturel. Ce flux d'air permet l'évaporation de l'eau.

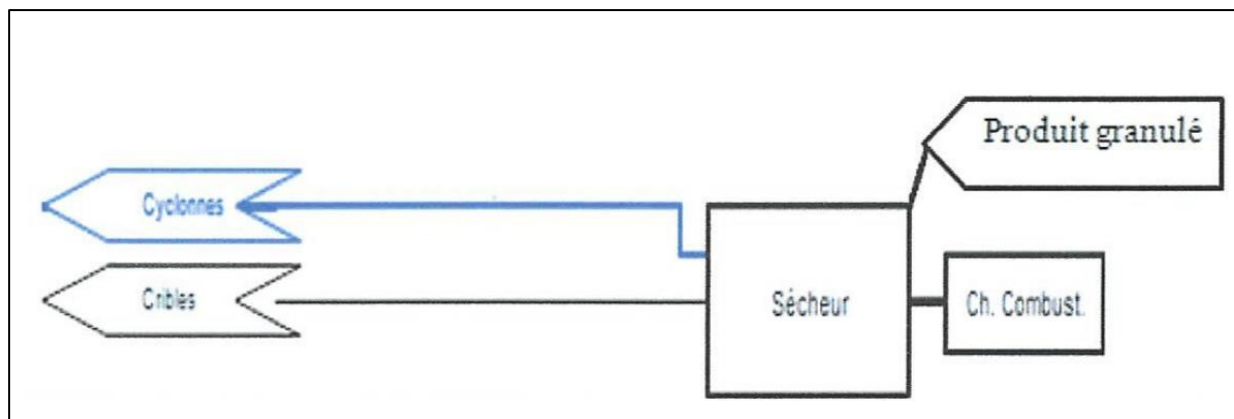


Figure 3.4 : Schématisation de la section séchage.[24]

3.1.5 Classification et broyage du produit :

Le granulé en sortie de sécheur est acheminé à l'aide d'un élévateur à godets vers un scalpeur, où il subit une première phase de classification. Puis passe par des tamis vibrants (grosse et fine maille) qui éliminent les particules hors gabarit. La fraction comprise entre 2 et 4 mm constitue le produit fini, dirigé vers la section de refroidissement. Une partie peut être recyclée grâce à une boîte à volets. Les fines passent directement en recyclage, tandis que les refus sont broyés avant d'être réintroduits dans le circuit. Le recyclage retourne vers le granulateur via une bande et un élévateur

à godets, un dispositif de pesage intégré permet de contrôler le débit recyclé.

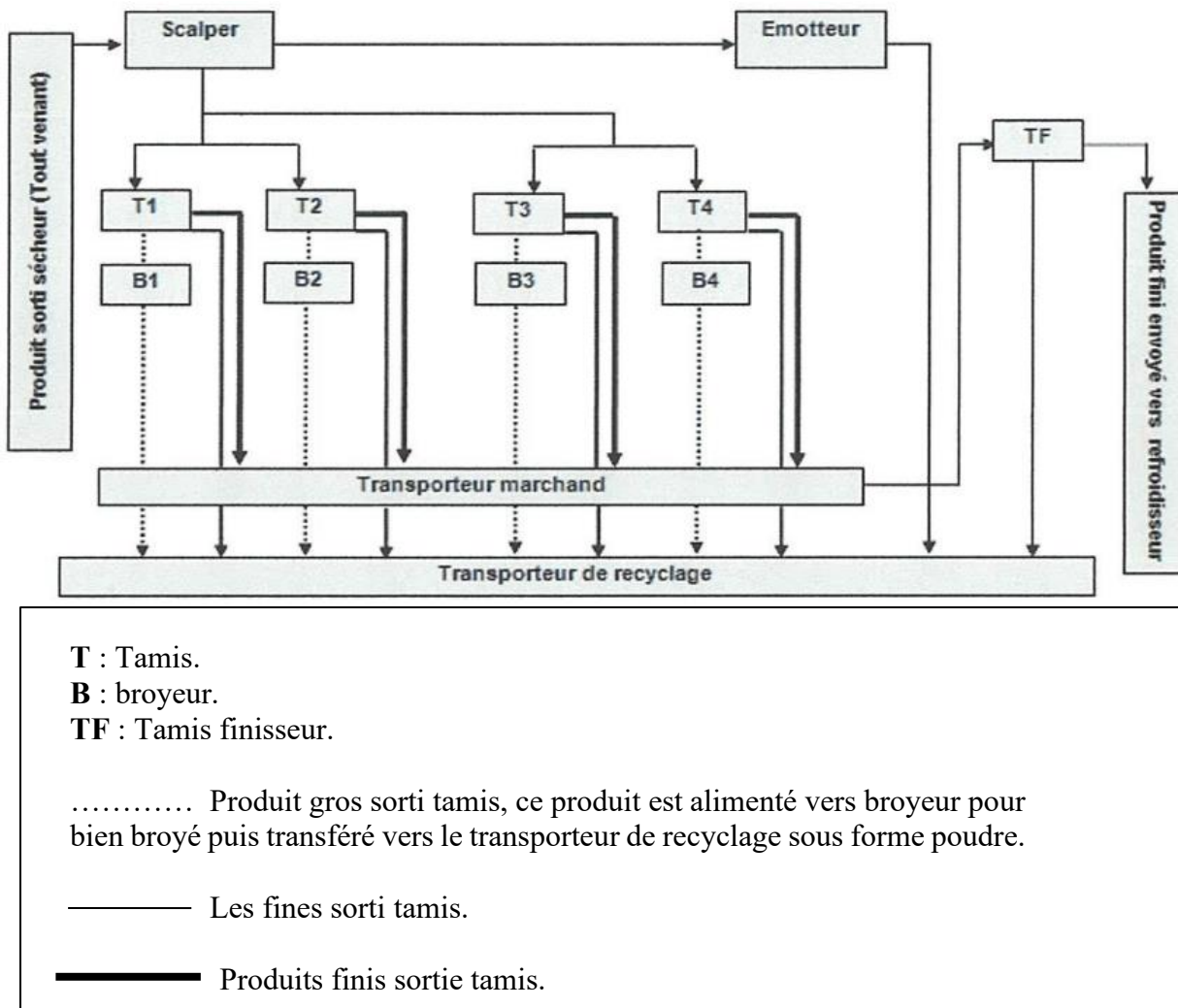


Figure 3.5 : Schématisation de l'opération classification et recyclage.

3.1.6 Refroidissement du produit :

Le tambour sécheur de la première ligne d'engrais a été adapté en tambour refroidisseur pour la deuxième ligne. L'air, préalablement traité et déshumidifié, circule en contre-courant du produit fini afin d'assurer un échange thermique optimal. Le fonctionnement de la batterie de refroidissement dépend principalement de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant. Pour le produit NPK (15-15-15), une humidité maximale de 1,3 % est généralement maintenue.

3.1.7 Enrobage du produit :

Enrobage : Le produit refroidi est dirigé vers l'enrobeur, où il est pulvérisé d'huile aminée chauffée pour éviter le colmatage. L'huile, préchauffée à l'aide de serpentines à vapeur, est aspirée par des pompes puis pulvérisée sur les granulés. Le produit enrobé est ensuite transporté vers les deux halls de stockage du produit fini via des convoyeurs à bande

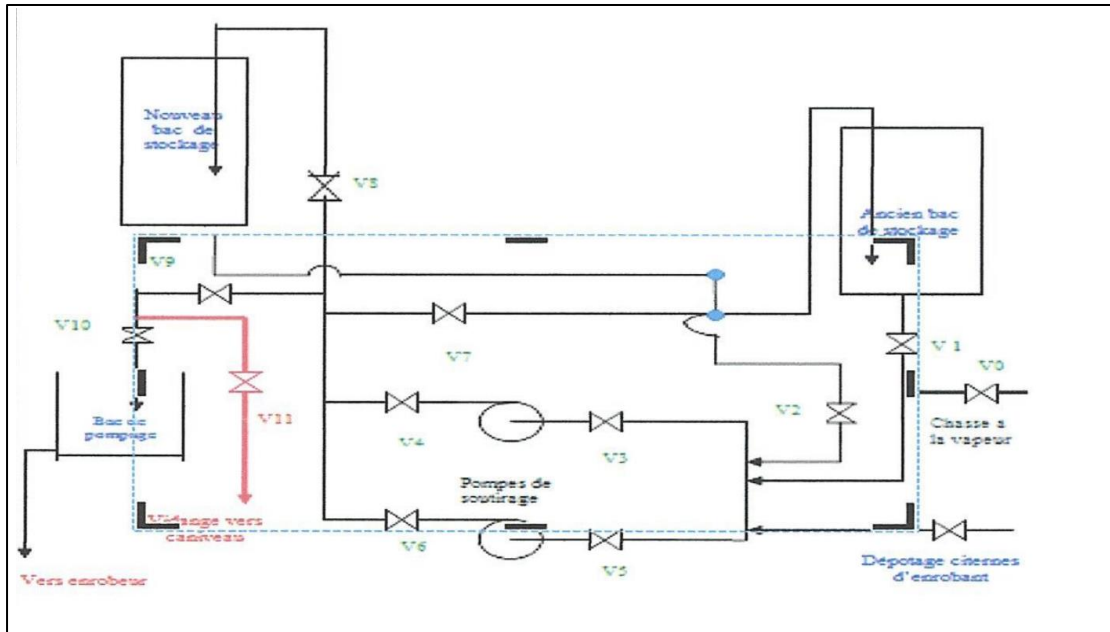


Figure 3.6 : Schématisation de la section d'enrobage.

3.1.8 Assainissement et lavage des gaz :

La fabrication des engrais génère des gaz, dont certains sont nocifs et chargés de poussières d'engrais. Afin d'éviter la pollution atmosphérique, un système de dépoussiérage et de lavage des gaz a été mis en place. Les gaz émis par la cuve d'attaque du granulateur sont dirigés vers une unité de lavage utilisant de l'eau de mer, ce qui permet d'éliminer le fluor provenant de l'acide phosphorique. Une fois traités, ces gaz épurés sont ensuite rejetés dans l'atmosphère.[6]

Conclusion :

Ce chapitre a présenté le processus de production des engrais NPK chez Fertial Annaba, en mettant en évidence ses principales étapes et son mode de fonctionnement actuel. Cette analyse nous a permis de prendre une vision globale de la gestion du flux existant et leur problème, afin d'être prêt à l'application de notre approche basée sur la méthode Kanban.

Chapitre 04 :

Application de la méthode
Kanban.

Introduction :

Ce chapitre porte sur l'intégration de la méthode Kanban dans le processus de production des engrais NPK. Il vise à présenter les différentes étapes de mise en œuvre de cette approche, à analyser son impact sur l'organisation du travail et la gestion des flux, ainsi qu'à discuter les résultats obtenus en termes de performance, d'efficacité et d'amélioration continue.

4.2 Définitions :

- **CMJ consommation moyenne journalière** : est la quantité moyenne d'un produit (comme l'eau, l'électricité, la nourriture, etc.) utilisée par une personne, un foyer ou une entreprise en une journée.

$$CMJ = \frac{\text{Le tonnage produit pour la période}}{\text{Les jours ouvrables}}$$

- **Cycle de fabrication en jour (TC)** : c'est le temps total estimé de passage de la matière dans l'îlot entre l'état brut et l'état fini.
- **Le pas de lancement (PL)** : Il s'agit du temps de fabrication minimum requis pour le lancement en lots des différents types d'engrais, permettant ainsi d'effectuer les changements de séries.

$$PL = \frac{\text{Temps de changement de série}}{\text{Temps résiduel dédié aux changements}}$$

- **Le temps résiduel** Il s'agit du temps de travail effectif, obtenu après déduction des temps improductifs ainsi que des durées de fabrication cumulées des deux types d'engrais.
- **Q la quantité des contenants** : c'est le tonnage des engrais que l'îlot contient.
- **Limite d'engagement (LE)** : c'est le nombre minimum des lots à lancer en production si l'en veut éviter des changements de série très nombreux : c'est l'équivalent de

4.3 Gammes de fabrication des engrais NPK :

- **Pour Sulfazote** :

Phase	Description	Durée(min)
-------	-------------	------------

Bacs de dosage	Dosage du phosphate, soufre élémentaire, ammoniac.	30
Cuve d'attaque primaire	Réaction acide phosphorique + ammoniac + soufre (90-110°C).	50
Cuve secondaire	Homogénéisation et stabilisation du mélange.	40
Granulateur rotatif	Mélange avec nitrate d'ammonium et recyclage des refus.	50
Sécheur	Séchage à 100-120°C.	70
Tamis	Criblage (2-4 mm).	25
Broyeur	Broyage des refus.	20
Refroidisseur	Refroidissement à 40°C max.	30
Dépoussiéreur	Traitement des gaz (SO ₂ , NH ₃).	35
		Total : 350 Temps critique : 70

➤ **Pour NPKs :**

Phase	Description	Durée (min)
Bacs de dosage	Dosage précis N-P-K (ex. nitrate, phosphate, KCl).	30
Cuve d'attaque primaire	Réaction acide phosphorique + ammoniac + sels de potassium.	35
Cuve secondaire	Ajout de micronutriments (Mg, Zn si nécessaire).	50
Granulateur rotatif	Granulation avec solution nitrate et recyclage.	65
Sécheur	Séchage à 90-110°C.	70
Tamis	Criblage (2-4 mm).	30
Broyeur	Broyage des refus.	25
Refroidisseur	Refroidissement à air ambiant.	25

Filtres à manches	Captation des poussières de potassium.	35
		Total :365 Temps critique : 70

4.4 Méthodologie :

La mise en œuvre d'un enchaînement KANBAN suit une méthodologie précise, appliquée à chaque référence traitée. Elle comprend les étapes suivantes :

1. Collecte des données nécessaires à l'organisation du flux :

- Analyse des caractéristiques du flux concerné,
- Identification des spécificités du poste amont (poste fournisseur),
- Définition des attentes et contraintes du poste aval (poste client).

2. Définition des paramètres de fonctionnement du système KANBAN :

- Détermination de la capacité des conteneurs (correspondant au lot minimum de transfert).
- Fixation de la taille minimale de lot de fabrication, indiquant le seuil de déclenchement (position de l'index vert),
- Définition du niveau minimum d'en-cours à maintenir pour éviter les ruptures (position de l'index rouge).[8]

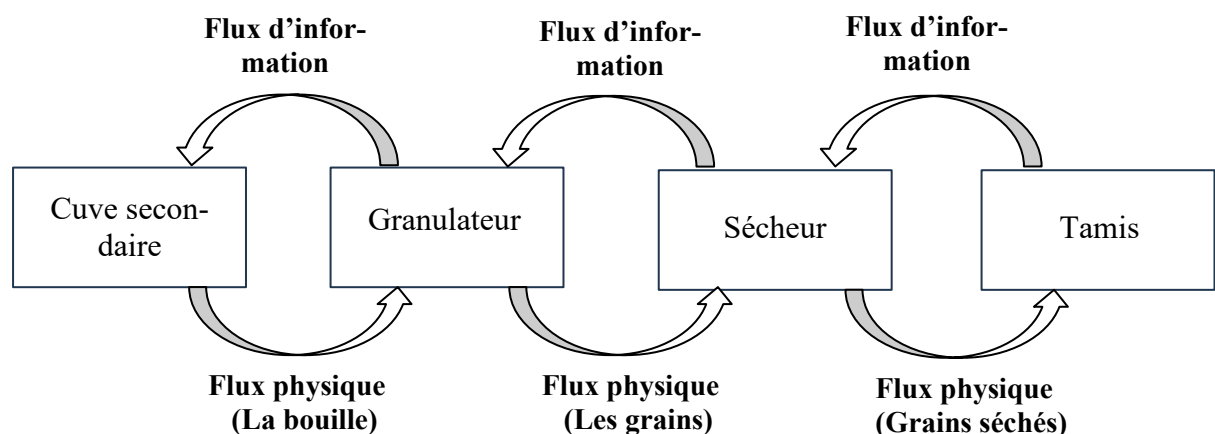
4.5 Application de la méthode :

Pour appliquer la méthode, on doit respecter les étapes suivantes :

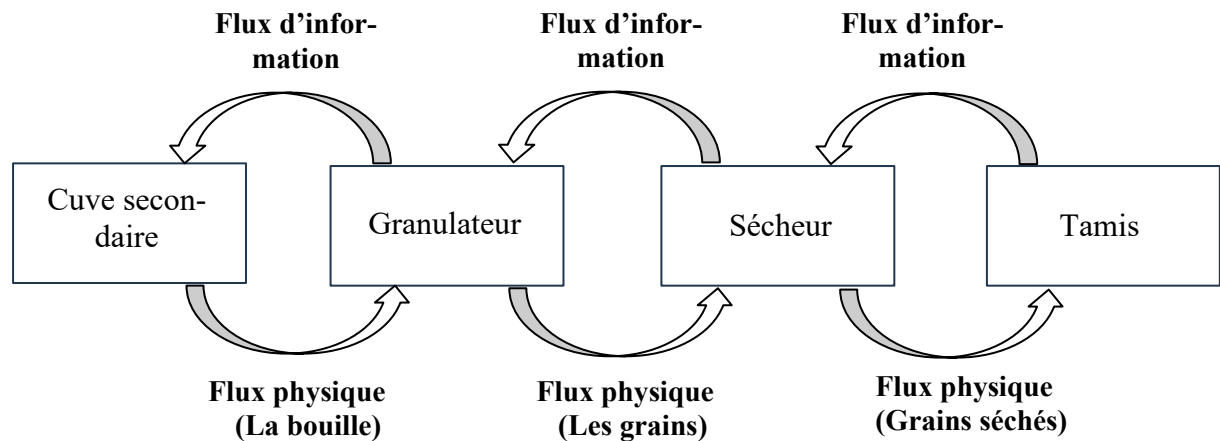
Etape 1 : Collecter les données relatives aux flux à organiser :

❖ Caractéristiques du flux :

Sulfazote :



NPKs :



- Une demande journalière moyenne de :

NPKs : 3 350 tonnes sur 28 jours → 119,6 tonnes/jour (≈ 120 t/j).

Sulfazote : 5 150 tonnes sur 28 jours → 183,9 tonnes/jour (≈ 184 t/j).

- Une variation de la demande : + ou – 10 %.

- Principe :

- L'îlot de fabrication des grains a pour rôle de transformer la bouillie issue de la cuve d'attaque secondaire. Une fois cette étape réalisée, il devient le poste fournisseur pour l'étape suivante, à savoir le séchage des grains, considéré alors comme le poste client.
- Dans cette logique, le granulateur, en tant que poste amont, ne doit produire que ce qui est requis par le poste aval.
- Pour assurer cette coordination, un système basé sur le KANBAN a été mis en place. Il permet de transmettre rapidement l'information de la demande du poste aval vers le poste amont, en sens inverse du flux physique de production.

❖ Caractéristiques des postes :

- Temps de travail : $3 \times 8\text{h} = 24\text{ h / jour}$ (1 440 min),
- Temps improductif = 15% → 1 224 min net/jour.
- Stock de sécurité (SS) : 2 jours pour chaque engrais.
- Temps de changement de série : 120 min (2h) entre NPKs et Sulfazote.

Etape 2 : Définir les paramètres de fonctionnement :

- Les données sont basées sur la production de février 2025 (28 jours).

- Capacité des lots : 40 tonnes pour NPKs et 60 tonnes pour Sulfazote.

Calculs pour le NPKs :

- CMJ = 120 tonnes/jour.
- Temps de cycle (TC) : 365 min

- Nombre de lots/jour : $1\,224 \text{ (min/jour)} / 365 \text{ (min/lot)} \approx 3 \text{ lots/jour (120 tonnes/jour)}$.

PL :

Temps résiduel = Temps net - Temps de production

Temps résiduel/jour = $1\,224 \text{ min (net)} - (3 \text{ lots} \times 365 \text{ min}) = 129 \text{ min}$.

PL = $120/129 = 0.93 \approx 1 \text{ jour}$

Nombre d'étiquettes (N) :

Commençant par le calcul du temps de cycle :

$$TC = \frac{365 \text{ min}}{1440 \text{ min/jour}} = 0.25 \text{ jours}$$

$$N = \frac{(TC + PL + SS) \times CMJ}{Q} = \frac{(0.25 + 1 + 2) \times 120}{40} = 9.75 \approx 10 \text{ lots}$$

Limite d'engagement (LE) :

Est calculée sous la formule suivante :

$$LE = \frac{PL}{Q} \times CMJ = \frac{1}{40} \times 120 = 3 \text{ lots}$$

Limite de sécurité (LS) :

Est calculée sous la formule suivante :

$$LS = SS \times \frac{CMJ}{Q} = 2 \times \frac{120}{40} = 6 \text{ lots}$$

Calculs pour le Sulfazote :

- CMJ = 184 tonnes/jour.
- Temps de cycle (TC) : 350 min/lot (5,83h)
- Nombre de lots/jour : $1\,224 / 350 = 3,4 \approx 3 \text{ lots/jour}$.

Temps résiduel/jour = $1\,224 \text{ min (net)} - (3 \text{ lots} \times 350 \text{ min}) = 174 \text{ min}$.

PL = $120/174 = 0.68 \approx 1 \text{ jour}$.

Nombre d'étiquettes (N) :

$$TC = \frac{350 \text{ min}}{1440 \text{ min/jour}} = 0.24 \text{ jour}$$

$$N = \frac{(0.24 + 1 + 2) \times 184}{60} = 9.9 \approx 10 \text{ lots}$$

Limite d'engagement (LE) :

$$LE = \frac{1}{60} \times 184 = 3 \text{ lots}$$

Limite de sécurité (LS) :

$$LS = 2 \times \frac{184}{60} = 6 \text{ lots}$$

Explication :

LE = 3 : Le seuil minimal pour lancer la production.

LS = 6 : lots suffisent pour couvrir 2 jours de demande.

PL = 1 : Fertial doit lancer un nouveau lot chaque jour pour éviter des changements de série trop fréquents.

Etape 3 : Mise en œuvre de planning kanban :

➤ Définir le planning d'ordonnancement :

Engrais NPK (Sulfazote)				
	Nombre de lots	Retour des étiquettes	Attente de mise en fabrication	En cours de fabrication
	1			Les étiquettes de cette colonne montrent le nombre de lots en cours de fabrication.
	2	Les étiquettes de cette colonne additionnées à celle de 'attente en cours de fabrication' représente la demande de l'atelier aval (3+1=4 lots)		
	3			
Index vert	4			
	5	Les étiquettes de cette colonne montrent le nombre de lots qui attendent que l'ilot soit disponible pour être fabriqué, il est toujours égal à la limite d'engagement (6 lots dans ce cas)		
Index rouge	6			
	7			
	8			
	9			
Index noir	10			
	11			
	12			

➤ Définir les règles de fonctionnement du planning :

Plus le nombre de Kanbans présents sur le planning est faible, plus le volume de matières en cours de production entre les postes amont et aval diminue. Ainsi, la régulation du flux de production s'opère principalement par la gestion et le contrôle du nombre de Kanbans visibles

sur le planning, Le système repose sur des règles précises d'ordonnancement :

1. **Lancement obligatoire** : lorsque l'étiquette atteint l'index rouge, cela signifie qu'une rupture d'approvisionnement au poste aval est imminente. Il devient alors impératif de lancer la fabrication.
2. **Lancement autorisé** : lorsque l'étiquette se situe entre l'index rouge et l'index vert, la production peut être déclenchée selon les besoins.
3. **Lancement interdit** : si l'étiquette atteint l'index vert, aucun lot ne doit être lancé. Ce dernier ne représente pas un lot de fabrication obligatoire. Par exemple, dans le cas de la production d'engrais, cela ne signifie pas que trois lots doivent être produits systématiquement. Cela indique simplement que le lancement d'un lot n'est autorisé qu'à partir du moment où au moins trois KANBANS sont présents sur le planning.[8]

4.6 Résultats et Discussions :

4.6.1 Les attendus de l'implémentation Kanban :

L'application de la méthode Kanban chez Fertial Annaba devrait générer des améliorations quantifiables sur 6 à 12 mois :

- Réduction des stocks intermédiaires :

Grâce au principe de flux tiré, les calculs montrent que le nombre optimal des lots (10 pour le NPKs, 10 pour le Sulfazote) permettrait de diminuer les stocks de 30 à 40% (vs le système actuel basé sur des prévisions).

- Amélioration du taux de service client :

En synchronisant la production avec la demande réelle, les délais de livraison pourraient être réduits de 15 à 20%.

- Diminution des gaspillages :

Moins de surproduction dû à la réduction des pertes liées au colmatage des engrais (estimée à 5-10% des coûts de production actuels).

4.6.2 Validation et Mesure du Succès (KPIs Proposés) :

Tableau 4.4 : Synthétique des KPIs (28 jours).

KPI	Formule	Valeur Actuelle	Cible Kanban
Taux de rotation des stocks	Quantité produite / Stock moyen → Cible : +25%	1.87	2.8 (+50%)
Taux de service client	(Cmd livrées à temps / Total cmd) × 100 → Cible : > 95%	80%	94%
Temps de cycle moyen	Temps total production / Nombre de lots → Cible : -20%	365 min/lot	292 min/lot

4.7 Comparaison entre le modèle existant et le modèle KANBAN :

➤ Comparaison des Flux de Travail :

Critère	Modèle Traditionnel	Modèle Kanban
Planification	Rigide (basée sur des prévisions à long terme)	Flexible (adaptée en temps réel)
Exécution	"Push" (tâches poussées dans le système)	"Pull" (tâches tirées selon la capacité)
Visualisation	Peu visible (rapports statiques)	Tableau visuel (colonnes + cartes)
Goulots d'étranglement	Détection tardive	Identification immédiate (via limites WIP)

➤ Gestion des Ressources et Flexibilité :

Aspect	Traditionnel	Kanban
Allocation des ressources	Fixe (par service/département)	Dynamique (équipes multidisciplinaires)
Réactivité	Lente (révisions planifiées)	Rapide (ajustements quotidiens)
Adaptabilité	Faible face aux changements	Haute (priorités ajustables visuellement)

➤ Réduction des Gaspillages (Lean) :

Type de Gaspillage	Traditionnel	Kanban
Surproduction	Fréquente (stocks excédentaires)	Éliminée (production en flux
Attentes	Files d'attente longues	Réduites
Défauts	Détectés tardivement	Corrigés tôt (étapes validées

4.8 Observations et recommandations :

Risques identifiés :

- Variabilité de la demande agricole : Kanban peut être fragilisé par des pics saisonniers. Une solution hybride (Kanban + stock tampon pour les périodes critiques) est à étudier.
- Résistance au changement : Une formation des opérateurs sur les nouveaux processus est essentielle (ex. ateliers pratiques).

Perspectives d'optimisation :

- Digitalisation : Utiliser des Kanbans électroniques (QR codes) pour un suivi en temps réel, comme testé chez Garcia-Alcaraz et al. [18].
- Extension à d'autres lignes : Appliquer la méthode à l'unité SSP après validation sur les NPK.

Conclusion :

La méthode Kanban permet une meilleure maîtrise des flux de production en évitant les en cours. Elle facilite le contrôle des stocks tout en assurant la réactivité face aux commandes. Les tableaux d'ordonnancement renforcent l'autonomie des opérateurs dans la gestion locale de leur poste. Cependant, cette étude reste limitée par la complexité du système de production et l'interdépendance de ses composantes.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'analyser en profondeur les possibilités d'amélioration des processus de production chez Fertial Annaba grâce à l'implémentation de la méthode Kanban. Notre étude a démontré que ce système de gestion des flux tirés présente des avantages significatifs pour l'entreprise, notamment en termes de réduction des stocks inutiles, d'optimisation des ressources et d'amélioration de la réactivité face aux demandes du marché. Les calculs précis des paramètres Kanban (nombre de cartes, limites d'engagement et de sécurité) ont fourni un cadre opérationnel concret pour une mise en œuvre efficace.

L'analyse détaillée du processus de fabrication des engrais NPK a révélé des opportunités claires d'optimisation, particulièrement au niveau des étapes de granulation et de séchage où les goulots d'étranglement étaient les plus prononcés. La méthodologie proposée, inspirée des meilleures pratiques du Lean Manufacturing mais adaptée au contexte spécifique de Fertial, montre comment synchroniser les différentes unités de production pour créer un flux plus harmonieux et efficient.

Cependant, la réussite de ce projet dépendra de plusieurs facteurs critiques : l'engagement de la direction, la formation adéquate du personnel, et la mise en place d'un système de suivi rigoureux. Les limites identifiées, comme les possibles résistances au changement ou les contraintes techniques existantes, devront faire l'objet d'une attention particulière lors de la phase de déploiement.

À plus long terme, cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour Fertial, notamment la possibilité de digitaliser le système Kanban ou de l'étendre à d'autres lignes de production. Elle constitue également une base solide pour de futures recherches sur l'application des méthodes Lean dans l'industrie des engrais en Algérie.

En définitive, ce travail souligne l'importance d'une approche systémique pour améliorer la performance industrielle, où le développement de la gestion des flux matériels et informationnels va de pair avec le développement des compétences humaines et l'innovation organisationnelle. La méthode Kanban, lorsqu'elle est correctement implémentée et adaptée au contexte local, se révèle être un outil puissant pour relever les défis de compétitivité auxquels fait face Fertial dans un marché en constante évolution.

Références :

- [1] Fertial. (s.d.). *Qui sommes-nous ?* Société des Fertilisants d'Algérie. <https://www.fertial-dz.com>
- [2] Oudjet Hibet Salleh. (2014). *État de l'art de l'entreprise FERTIAL (SPA)* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba, Département de Génie mécanique].
- [3] Abbaz, I., & Belkacemi, C. (2024). *Étude et amélioration d'un poste de production – Cas de l'entreprise FERTIAL Annaba* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba, Département de Génie Industriel].
- [4] Google Earth. (2025). *Vue satellite*. Capture réalisée le 5 juin 2025.
- [5] Oudjet Hibet Salleh. (2014). *État de l'art de l'entreprise FERTIAL (SPA)* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba, Département de Génie mécanique].
- [6] Tebib, H. (2016). *Procédé de fabrication et analyses physico-chimiques du produit NPK (triple 15) fabriqué au niveau du Fertial d'Annaba* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba, Département de Génie des procédés].
- [7] Fertilisation EDU. (2025). *Principe de fabrication des engrais NPK, procédé nitrique* [Image en ligne]. Consulté le 13 mars 2025, depuis <https://fertilisation-edu.fr/production-res-sources/engrais-mineraux-composes.html>
- [8] Fadel, K. (2020). *Gestion de la production par la méthode Kanban – Application : Ligne de production des tôles, unité : Laminoir à chaud « LAC », entreprise : SIDER – Annaba* [Mémoire de fin d'études, Département électromécanique].
- [9] LEAN Institute France. (2020). *Le système Kanban et la gestion des flux tirés*. <https://blog-gestion-de-projet.com/flux-tires/> (Consulté le 1 juin 2025 à 17:25).
- [10] Boukherroub, T. (2009). *Contribution à la modélisation d'un atelier de production et à l'étude du kanban dynamique* [Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique d'Alger]. <https://repository.enp.edu.dz/xmlui/handle/123456789/6627>
- [11] Kumar, S., & Sharma, R. (2019). Implementation of Kanban System in Pharmaceutical Industry: A Case Study. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 68(5), 1014–1032. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2018-0094>
- [12] SHARE IT SMART. (2021). *Case Study: Optimizing Supply in the Production Line with Jidoka Kanban*. <https://share-it-smart.com/en/case-studies/case-study-optimizing-supply-in-the-production-line-with-jidoka-kanban/> (Consulté le 22 mars 2025).

- [13] Santos, J., et al. (2021). Digital Kanban System for Aircraft Components Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.11.005>
- [14] García-Alcaraz, J. L., et al. (2022). Kanban Implementation in Electronics Manufacturing: A Case Study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3-4), 2345–2360. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08342-2>
- [15] Abbaz, I., & Belkacemi, C. (2024). *Étude et amélioration d'un poste de production – Cas de l'entreprise FERTIAL Annaba* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba, Département de Génie Industriel], Chapitre 3 : Procédés de fabrication des engrais NPK, p. 20.
- [16] Tebib, H. (2016). *Procédé de fabrication et analyses physico-chimiques du produit NPK (triple 15) fabriqué au niveau du Fertil d'Annaba* [Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar – Annaba, Département de Génie des procédés], Chapitre 3 : Procédé de fabrication du NPK (15-15-15), pp. 22–31.
- [17] Fadel, K. (2020). *Gestion de la production par la méthode Kanban – Application : Ligne de production des tôles, unité : Laminoir à chaud « LAC », entreprise : SIDER – Annaba* [Mémoire de fin d'études, Département électromécanique], Chapitre 3 : Mise en place de la méthode Kanban dans l'usine de production des tôles métalliques « LAC », pp. 40, 54.
- [18] Silva, R., & Almeida, J. (2021). Digitalisation des processus Kanban dans l'industrie aéronautique. *Revue Internationale de Production*, 45(3), 211–225. <https://doi.org/10.1007/rip.2021.45.3.211>

