الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
National Higher School of Advanced Technologies

Département du second cycle

Mémoire de Master

En vue l'obtention du diplôme de master

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Traction électrique**

Thème :

ETUDE DES MODES DE MARCHE ET D'ARRÊT D'UN SYSTÈME DE SÉCHAGE

Réalisé par : **ZITOUNI TERKI Nada**

Encadrée par : **M.TEFFAHI Abdelkader**

2024/2025

Dedicase

Pour mes parents :
Merci pour votre amour inconditionnel et vos sacrifices silencieux. Vous êtes ma force, mon refuge, et ma plus grande bénédiction.

Pour mes sœurs Malek et Samia :
Vous êtes mes complices, mes confidentes, et mes piliers dans chaque étape de ma vie. Je vous aime pour tout ce que vous êtes et tout ce que vous m'apportez.

Pour mon frère islam :
Ta présence est un mélange de protection et d'humour qui embellit ma vie. Merci d'être toujours là, avec ton cœur grand et ta fidélité sans faille.

Pour mes amis :
Merci de remplir ma vie de rires, de soutien et de beaux souvenirs. Vous êtes une famille choisie, et je vous garde dans mon cœur avec gratitude.

Remerciement

Au début de ce travail, je voudrais avant tout remercier Dieu, qui m'a donné la santé, la patience et la force nécessaires pour accomplir ce travail.
Je tiens ensuite à remercier tout particulièrement mon professeur, **Dr. TEFFAHI Abdelkader,** pour son accompagnement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de cette expérience.

Mes remerciements les plus sincères vont à Monsieur **AISSIOU Mohamed** et Monsieur **BENKRAOUDA Souleymen**, les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail, pour toute l'attention qu'ils vont prêter à l'évaluation de ce travail.

Je suis aussi reconnaissante envers tous les enseignants qui m'ont soutenu(e) tout au long de mon parcours universitaire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments les plus respectueux.

ملخص

يعرض هذا البحث دراسة شاملة لأوضاع التشغيل والتوقف لنظام صناعي للتجفيف، بالاعتماد على منهجية GEMMA. يهدف إلى نموذجة حالات النظام لفهمه بشكل أفضل وتحسين السلامة والصيانة. تساهم هذه المقاربة في تحسين أداء النظام عند التشغيل وضمان موثوقيته. كما تفتح الدراسة آفاقاً للتطوير باستخدام الأدوات الرقمية.

Résume

Ce mémoire analyse les différents modes de marche et d'arrêt d'un système de séchage industriel à l'aide de la méthode GEMMA. Il vise à modéliser les états du système pour en améliorer la compréhension, la sûreté et la maintenance. L'étude permet d'optimiser les conditions de transition et la mise en service. Elle propose également des pistes d'amélioration technico-économiques grâce aux outils numériques.

Abstract :

Using the GEMMA method, this thesis provides a thorough examination of an industrial drying system's working and stopping modes. Modelling the system's states is intended to improve comprehension, security, and upkeep. The chosen strategy enhances system reliability and streamlines startup procedures. By using digital techniques, the study also provides insights into the future.

Table de matières :

Introduction générale

Chapitre 1 : Présentation du système de séchage

1.1 Introduction……2
1.2 définition……4

1.3 Principe de fonctionnement…….....4

1.3.1 Cycle de séchage typique……5

1.3.2 Enchaînement des étapes…….6

1.3.3 Conditions de démarrage et d'arrêt……..6

1.4 Architecture technique du système…….7

1.4.1 Vue d'ensemble du système……7

1.4.2 Système de commande et supervision……....7.

1.4.3 Interfaces opérateur et sécurité……7

1.5 Description des principaux sous-ensembles……8

1.5.1 Capteurs et actionneur……..8

1.5.2 Organe de traitement thermique……...9

1.5.3 Structure mécanique et support……9

1.6 Problèmes rencontrés et axes d'amélioration……9
1.7 Justification de l'analyse par la méthode GEMMA……..10

Chapitre 2 : Application du GEMMA au système de séchage

2.1
Introduction……...12

2.2 Présentation de la méthode GEMMA……..12

2.2.1 Définition et principes……....12

2.2.2 Objectifs et intérêt dans les systèmes automatisés…….14.

2.2.3 Pertinence de son application au système étudié……....14

2.2.4 Rôle dans la conception fonctionnelle……14

2.3 Identification des modes de fonctionnement…….15.
2.3.1 Modes de marche……...15
2.3.2 Modes d'arrêt…….17
2.3.3 Conditions de transition entre modes……18
2.3.4 Modes en cas de défaillance……...19
2.3.5 Actions associées aux états……20
2.4 Représentation graphique……21
2.4.1 Graphe GEMMA normalisé……21
2.4.1.1 Mise en contexte……21
2.4.1.2 Démarche progressive vers le GEMMA……...21
2.4.1.3 Utilité du Graphe GEMMA……...23
2.4.2 Vérification de la cohérence……23
2.5 Étude de scénarios types……...24
2.5.1 Démarrage standard……..24
2.5.2 Arrêt d'urgence et relance……24
2.5.3 Passage en mode maintenance……..24
2.5.4 Gestion des défauts……...24.
2.6 Exploitation de l'analyse GEMMA……..24
2.6.1 Impacts sur la conduite et la maintenance……24
2.6.2 Transition vers la modélisation en Grafcet……25
2.6.3 Recommandations techniques……26
2.7 Bilan de l'analyse GEMMA……..26
2.7.1 Apports à la compréhension du système……26
2.7.2 Aide à la maintenance et à la sécurité……26
2.7.3 Optimisation pour la mise en service……26
2.7.4 Limites et perspectives……...26
2.8 Conclusion……27

Conclusion Générale……...28

Liste de figures :

Figure 1.2 : représente Schémas comparatifs du séchage co-courant et contre-courant par entraînement

Figure1.1 : représente le schéma descriptif les processus de

Figure 1.3 : Schéma de fonctionnement d'un procédé de séchage sous vide

Séchage

Figure 1.4 : Guide du processus de mise en œuvre

Figure 1.5 : schéma principe de captures

Figure 1.6 : schéma principe d'un actionneur

Figure 2.1 : Les familles et les sous-familles de procédures

Figure 2.2 : schéma les modes de marches (famille A)

Figure 2.3 : schéma représente les modes d'arrêts

Figure 2.4 : schéma représente le cas de défaillance

Figure 2.5 : Extraits du GEMMA (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt) de l'installation

Figure 2.6 : représente le GRAPHCET de GS

Liste de tableaux :

Tableau 1.1 : représente Classification fonctionnelle des sous-ensembles du système de séchage

Tableau 2.2 : Tableau récapitulatif des transitions entre modes GEMMA

Tableau 2.3 : actions spécifiques réalisées par le système pour chaque état GEMMA

Introduction générale :

L'automatisation des systèmes industriels représente aujourd'hui un levier essentiel pour améliorer la performance, la fiabilité et la sécurité des procédés de production. Parmi ces systèmes, les installations de séchage jouent un rôle fondamental, notamment dans les industries où le traitement thermique constitue une étape critique, comme dans la fabrication de bobines de fils.

Le bon fonctionnement de ces systèmes automatisés repose sur une gestion rigoureuse des différents modes de marche, d'arrêt et de transition. Dans ce contexte, la méthode GEMMA (Guide d'Étude des Modes de Marches et d'Arrêts) se présente comme un outil méthodologique efficace pour modéliser les états fonctionnels d'un système, tout en intégrant les contraintes de sécurité, de maintenance et d'exploitation.

Le présent mémoire s'inscrit dans une démarche d'analyse des modes de marche et d'arrêt d'un système de séchage industriel à l'aide de la méthode GEMMA. Il est structuré en deux chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du système de séchage, avec une description détaillée de son architecture, de son fonctionnement, de ses composants et des contraintes techniques associées.

Le deuxième chapitre porte sur l'application de la méthode GEMMA au système étudié, en identifiant les états de marche, d'arrêt normal et de défaillance, ainsi que les interactions entre les automatismes et les actions humaines.

Cette étude vise à mettre en évidence l'intérêt de la méthode GEMMA dans la compréhension globale du comportement d'un système automatisé, tout en apportant des pistes d'amélioration pour la mise en service, la maintenance et la fiabilité du processus de séchage.

Chapitre 1 : Présentation du système de séchage

1.1 Introduction

Le séchage est une étape essentielle dans divers procédés industriels, car il permet de réduire l'humidité des produits pour en améliorer la conservation et la qualité. Ce procédé intervient notamment dans les secteurs textile, alimentaire ou encore pharmaceutique.

Le système de séchage étudié dans ce mémoire a été conçu pour répondre à des exigences précises en termes de rendement et d'efficacité. Son intégration dans la chaîne de production permet de garantir une homogénéité du traitement.

Ce chapitre vise à présenter les caractéristiques générales du système. Il introduit également son rôle dans le processus industriel global. La suite du travail détaillera sa structure et son fonctionnement.

1.2 Définition

Le séchage est une opération permettant d'éliminer un liquide contenu dans un mélange homogène ou hétérogène. Il s'agit de fournir l'énergie nécessaire pour provoquer l'évaporation de l'eau présente dans le produit, puis d'évacuer la vapeur générée. Cette opération vise à restaurer certaines propriétés du matériau traité ou à prolonger sa durée de conservation en facilitant son stockage.

On distingue plusieurs méthodes de séchage, notamment :

- Les procédés mécaniques, tels que le pressage, la décantation ou la centrifugation.
- Les procédés physico-chimiques, comme l'adsorption, l'absorption, la réfrigération ou encore le séchage par évaporation.

Cette dernière repose sur le passage du liquide vers la phase gazeuse, ce qui nécessite un apport thermique important. Cette chaleur peut être fournie de manière directe (par échangeur thermique, effet Joule, rayonnement infrarouge ou haute fréquence), ou bien transmise par un fluide chauffé tel que de l'air chaud.

Le séchage par évaporation implique deux phénomènes conjoints : un transfert thermique pour évaporer l'humidité, et un transfert de masse pour faire migrer cette humidité de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces processus, énergivores, justifient l'intérêt croissant pour l'usage de sources d'énergie renouvelable. [1]

1.3 Principe de fonctionnement

Le séchage industriel est avant tout un moyen d'enlever la matrice aqueuse que contiennent les produits (textiles, bois, aliments, etc.) par l'application d'une énergie thermique et d'un flux d'air régulé.

Le principe est basé sur le transfert thermique et le mouvement de l'air pour augmenter la vitesse d'évaporation de l'eau.

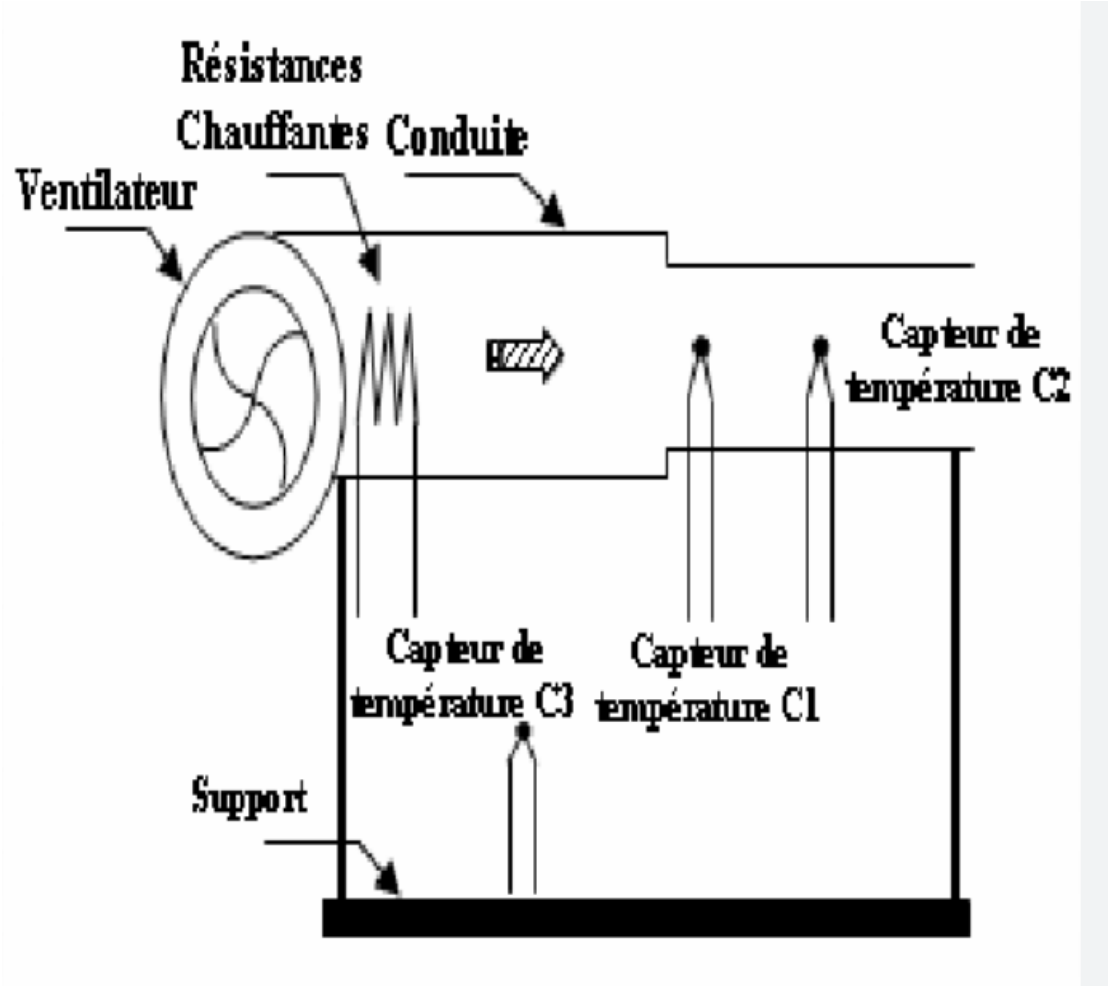


Figure1.1 : représente le schéma descriptif les processus de séchage

1.3.1 Cycle de séchage typique

Le cycle de séchage commence par une élévation progressive de la température dans l'enceinte. Cette chaleur permet de déclencher l'évaporation de l'humidité présente dans le produit. Ensuite, un maintien thermique favorise l'extraction complète de l'eau, puis une phase de refroidissement stabilise le produit pour éviter les chocs thermiques.

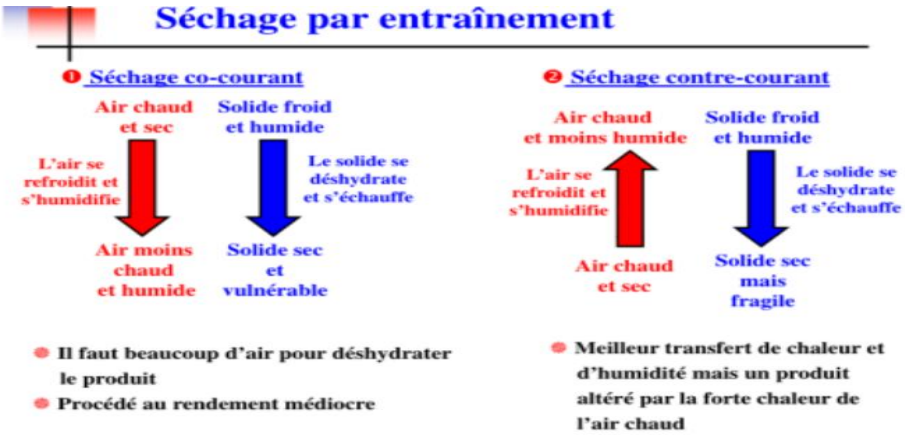


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement des séchages co-courant et contre-courant

1.3.2 Enchaînement des étapes

Le cycle de séchage industriel s'articule suivant la hiérarchie suivante : chargement du produit, point de départ du chauffage, circulation d'air chaud, extraction de l'humidité, puis refroidissement et enfin déchargement.

Le déroulement de chacune de ces étapes est géré par des automates et des capteurs qui rendent stable la conduite du processus de manière à garantir la qualité du produit fini. [2]

1.3.3 Conditions de démarrage et d'arrêt

Le démarrage du système repose sur la vérification de plusieurs conditions :

La disponibilité d'énergie, l'état des capteurs, la fermeture de la chambre et le bon positionnement du produit. En position d'arrêt, les sécurités coupent l'énergie thermique et l'énergie ventilation, protégeant ainsi les opérateurs et les équipements. [3]

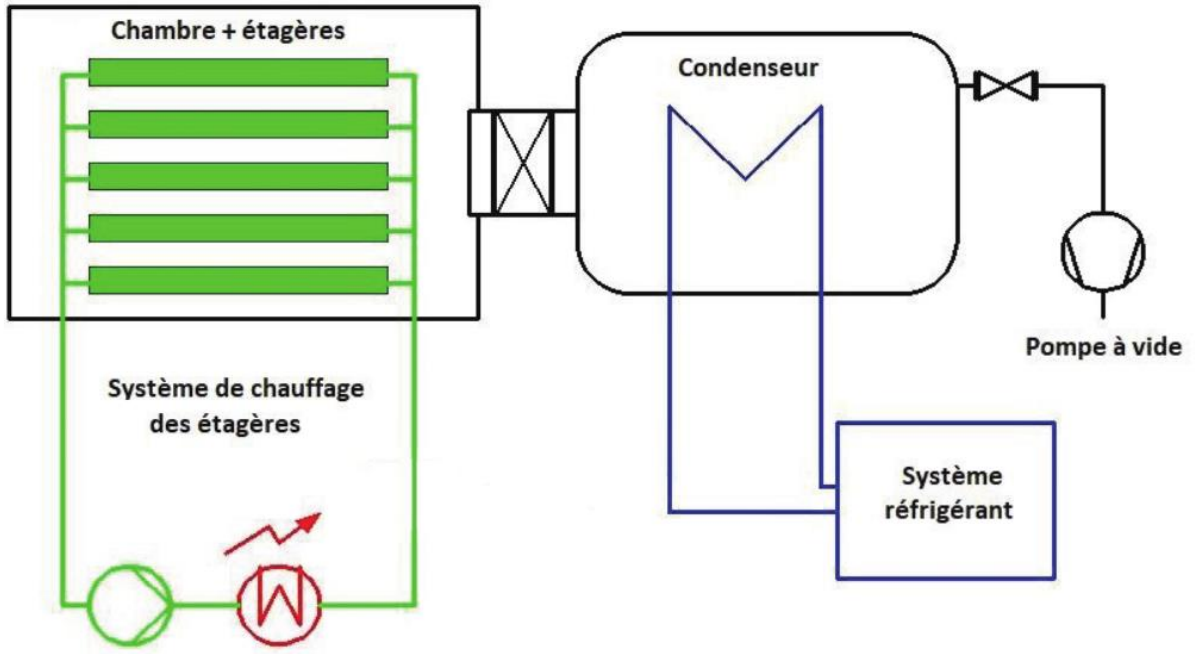


Figure 1.3 : Schéma de fonctionnement d'un procédé de séchage sous vide

1.4 Architecture technique du système

1.4.1 Vue d'ensemble du système

L'ensemble du dispositif de séchage est constitué de plusieurs éléments essentiels qui travaillent ensemble pour un séchage efficace et homogène. La chambre de séchage accueille le produit dans un environnement contrôlé, la source de chaleur produit l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'humidité et les ventilateurs assurent la circulation de l'air chaud pour un bon transfert thermique.

Les capteurs mesurent en permanence la température, l'humidité et la pression pour contrôler ces paramètres.

- Cette architecture cherche à minimiser les pertes énergétiques
- optimisation la performance du système. [4]

1.4.2 Système de commande et supervision

Le pilotage du procédé est sous l'autorité d'un automate programmable industriel (API) qui commande toutes les phases du cycle de séchage, de la mise en fonctionnement à l'arrêt, en régulant la température et le débit d'air à partir des mesures des capteurs. L'ensemble est complété par un système de supervision SCADA qui permet la visualisation en temps réel des paramètres et le stockage des données, ainsi que la gestion des alarmes.

1.4.3 Interfaces opérateur et sécurité

L'interface opérateur (HMI) donne aux techniciens la possibilité de maîtriser et d'ajuster facilement les réglages du système. On accède simplement aux réglages, aux historiques et aux alarmes.

On trouve également des dispositifs de sécurité tels que les capteurs de surchauffe, les arrêts d'urgence, le verrouillage.

Ces dispositifs permettent de protéger l'opérateur et l'appareil et tout en garantissant le maintien des performances de séchage.

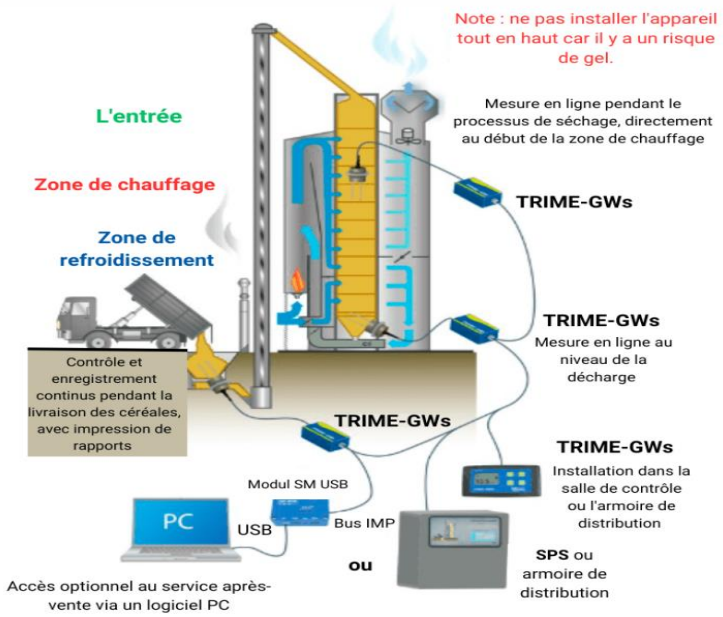


Figure 1.4 : Schéma fonctionnel d'un séchoir automatisé avec supervision et contrôle en ligne

1.5 Description des principaux sous-ensembles

1.5.1 Capteurs et actionneurs

Les capteurs mesurent en continu des paramètres clés comme la température, l'humidité, la pression ou le débit d'air, indispensables au contrôle précis du séchage.



Figure 1.5 : schéma principe de captures

Les actionneurs reçoivent les commandes de l'automate et modifient les éléments du système, tels que l'ouverture de vannes ou la vitesse des ventilateurs. Ensemble, ils assurent une régulation automatique qui adapte en temps réel les conditions du séchage selon les besoins du produit.



Figure 1.6 : schéma principe d'un actionneur

1.5.2 Organe de traitement thermique

L'organe thermique est l'organe qui fournit l'énergie nécessaire au séchage, à partir de dispositifs tels que les brûleurs, les échangeurs, les résistances… Son efficacité est fonction de la bonne gestion de la température pour que l'évaporation se fasse sans dégrader le produit au séchage, d'une limitation des pertes d'énergie et d'une bonne sécurité.

1.5.3 Structure mécanique et support

La structure mécanique est l'organe qui supporte tous les composants du système de séchage. Elle doit être rigide, résistante à la chaleur, et au mieux facilitant l'entretien. Selon fréquence d'utilisation et environnement, elle est fabriquée de matériaux durables, l'acier inoxydable, la fonte, le plastique, de façon à assurer longévité et stabilité de l'installation.[5]

Sous-ensemble	Fonction principale	Exemples de composants	Critères importants
Capteurs et actionneurs	Mesure et ajustement des paramètres de séchage	Thermocouples, capteurs d'humidité, vannes, moteurs	Précision, rapidité, fiabilité
Organe de traitement thermique	Fourniture et régulation de la chaleur	Brûleur à gaz, éléments chauffants, échangeurs thermiques	Rendement énergétique, sécurité
Structure mécanique et support	Support et stabilité des équipements	Châssis métallique, supports, fixations	Robustesse, résistance thermique, accessibilité

Tableau 1.1 : représente Classification fonctionnelle des sous-ensembles du système de séchage

1.6 Problèmes rencontrés et axes d'amélioration

L'exploitation du système de séchage a révélé certains dysfonctionnements qui limitent ses performances. L'un des défauts les plus notables concerne l'instabilité thermique observée

Pendant certains cycles, pouvant entraîner un séchage incomplet ou excessif. À cela s'ajoute une dégradation progressive de la fiabilité des capteurs d'humidité, souvent altérés par des dépôts ou des variations environnementales, ce qui fausse les mesures nécessaires à la régulation.

Des lenteurs dans la réaction des actionneurs ont également été relevées, affectant la précision des ajustements. Pour remédier à ces faiblesses, plusieurs améliorations sont envisageables, notamment le renforcement de la qualité des capteurs, la modernisation des modules de commande, ainsi que l'adoption de solutions énergétiques plus efficaces et écologiquement viables.

1.7 Justification de l'analyse par la méthode GEMMA

L'approche GEMMA a été choisie comme outil d'analyse en raison de sa capacité à représenter de manière claire et méthodique les différents modes de fonctionnement d'un système automatisé.

Cette méthode repose sur une modélisation graphique qui décrit l'évolution d'un processus selon ses états (marche, arrêt, défaut) et les transitions associées.

Dans le cadre du système de séchage étudié, elle permet non seulement de structurer la compréhension des enchaînements logiques entre les étapes, mais aussi de faciliter l'identification des points sensibles du fonctionnement. En outre, elle constitue un support précieux pour la conception ou l'amélioration de la supervision, en assurant une meilleure maîtrise du cycle global.

Chapitre 2 : Application du GEMMA au système de séchage

2.1 Introduction

Dans les études faites précédente, le cahier des charges était volontairement réduit à sa plus simple expression, c'est-à-dire, à ce que l'on appelle les spécifications fonctionnelles. Celles-ci permettent de décrire le fonctionnement attendu du système à une situation de production normale, pendant laquelle il n'y a pas d'incident, nous appellerons grafcet de fonctionnement normale (GFN).

Cependant, les systèmes automatisés sont pratiquement sujets de pannes, de réparations et d'arrêts.

Ces situations inévitables dans la vie d'une usine et conduisant aux modes de marches particuliers, doivent être considérées lors de la conception et au cours de l'exploitation de chaque automatisme.

Les exemples typiques de modes de marches particuliers sont : vérification manuelle étape par étape, préparation pour mise en route, et arrêt d'urgence à la suite d'une défaillance.

2.2 Présentation de la méthode GEMMA

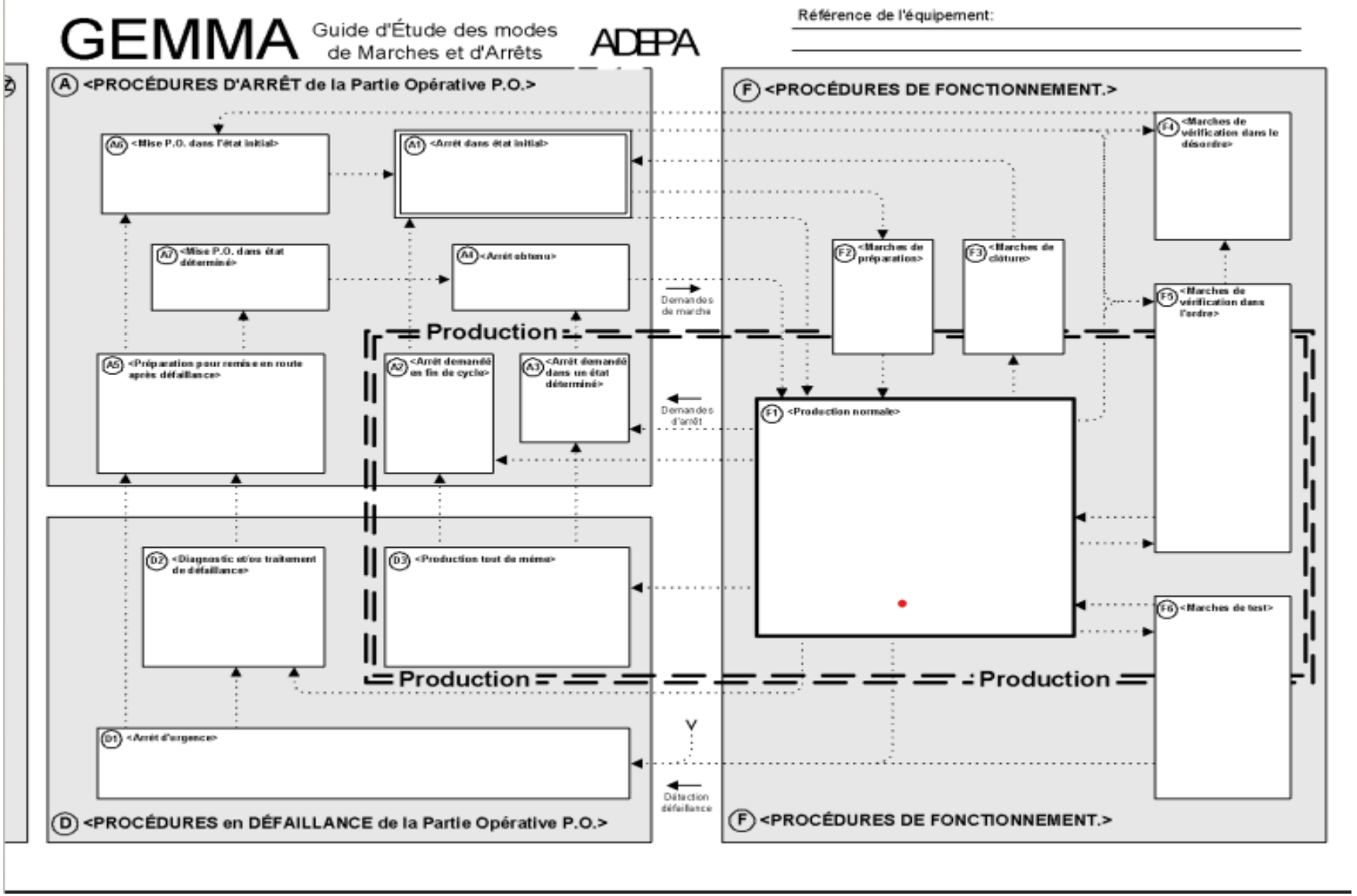
2.2.1 Définition et principes

Le GEMMA (acronyme de Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt) est un guide graphique (document graphique) permettant de sélectionner et de décrire simplement les différents états de marches et d'arrêts, ainsi que les possibilités d'évoluer d'un état à un autre. Il a été créé parce qu'il y avait un grand besoin d'avoir un vocabulaire commun et précis. Le GEMMA permet d'avoir une approche guidé de l'analyse des modes de marches et d'arrêts.

Le GEMMA permet le recensement et la description des différents états du système automatisé, de la mise en route à la production normale. Il précise les procédures à mettre en œuvre après analyse d'une anomalie ou un défaut de fonctionnement. Pour une machine donnée, les modes

de marches et d'arrêts doivent être choisis et compris de toutes les personnes chargées d'intervenir.

Un GEMMA est établi pour chaque machine lors de sa conception, puis utilisé tout au long de sa vie : réalisation, mise au point, maintenance, modifications, réglages… Dans ses principes et dans sa mise en œuvre, le GEMMA doit donc être connu de toutes les personnes concernées par les automatismes, depuis leur conception jusqu'à leur exploitation. [6]


GEMMA
Guide d'Étude des modes de Marches et d'Arrêts
ADEPA
Référence de l'équipement:
A <PROCÉDURES D'ARRÊT de la Partie Opérative P.O.>
A6 <Mise P.O. dans l'état initial>
A1 <Arrêt dans état initial>
A7 <Mise P.O. dans état déterminé>
A4 <Arrêt obtenu>
A5 <Préparation pour remise en route après défaillance>
A2 <Arrêt demandé en fin de cycle>
A3 <Arrêt demandé dans un état déterminé>
Demandes de marche
Demandes d'arrêt
Production
F <PROCÉDURES DE FONCTIONNEMENT.>
F4 <Marches de vérification dans le désordre>
F2 <Marches de préparation>
F3 <Marches de clôture>
F5 <Marches de vérification dans l'ordre>
F1 <Production normale>
F6 <Marches de test>
Production
Production
D2 <Diagnostic et/ou traitement de défaillance>
D3 <Production tout de même>
D1 <Arrêt d'urgence>
Détection défaillance
D <PROCÉDURES en DÉFAILLANCE de la Partie Opérative P.O.>
F <PROCÉDURES DE FONCTIONNEMENT.>

2.2.2 Objectifs et intérêt dans les systèmes automatisés

La méthode GEMMA vise à représenter simplement les différents états de marche et d'arrêt d'un système automatisé, incluant aussi bien le fonctionnement normal que les modes particuliers liés à des anomalies ou des interventions. Elle fournit un vocabulaire commun qui facilite la compréhension des transitions entre ces états.

Cette approche permet d'intégrer dès la conception les situations exceptionnelles, ce qui améliore la sécurité, la fiabilité et la communication entre les différents acteurs du système. En résumé, GEMMA est un outil essentiel pour une gestion efficace et sécurisée des automatismes.[7]

2.2.3 Pertinence de son application au système étudié

Dans le système étudié, qui présente plusieurs modes de fonctionnement (mise en route, production, arrêt d'urgence, maintenance), GEMMA permet de modéliser clairement tous ces états et leurs transitions. Cette modélisation aide à prévenir les erreurs de programmation et facilite la maintenance.

En intégrant GEMMA dès la phase de conception, on garantit une meilleure maîtrise des situations exceptionnelles et un fonctionnement plus sûr. Par conséquent, GEMMA constitue un outil adapté et utile pour ce projet.

2.2.4 Rôle dans la conception fonctionnelle

Les concepts de base : Comme le montre le schéma ci-dessous, le GEMMA est composé de deux grandes parties :

- **Partie commande hors énergie** : Cette zone du GEMMMA, située à l'extrême gauche, correspond à l'état inopérant de la partie commande. Elle ne figure que pour la forme. Dans cet état, la partie opérative n'est pas sous le contrôle de la partie commande. La partie opérative peut être en énergie ou hors énergie. La sécurité est garantie par les choix technologiques, la procédure de mise en énergie de la partie opérative, …

- **Partie commande en énergie et active** : cette zone permet de décrire ce qui se passe lorsque la partie commande (P.C.) fonctionne normalement. Elle couvre la quasi-totalité du guide graphique. Cette partie va nous permettre de définir les différents modes de marches et d'arrêt de notre machine ainsi que les conditions de passage d'un mode à l'autre. Elle est subdivisée en trois zones ou en trois familles de procédures :

Famille A : Procédures d'arrêt et de remise en route de la partie opérative : une installation ne peut fonctionner indéfiniment. Il s'avère nécessaire de l'arrêter (à partir du pupitre de commande) de temps à autre pour des raisons normales indépendantes du système :

- Fin de journée,
- Pause,
- Manque d'approvisionnement

Famille D : Les procédures de défaillances de la partie opérative : rares sont les systèmes qui fonctionnent sans incident durant toute leur vie.

Il convient de considérer qu'il subira des pannes, prévisibles ou non. Dans cette famille, on retrouvera tous les modes qui amènent le système à l'état d'arrêt pour des motifs intérieurs au système, en l'occurrence pour cause de défaillance de la partie opérative.

Les procédures de la famille D ont pour buts de réduire au maximum les conséquences ou les risques pour le personnel ou le matériel.

Famille F : modes de fonctionnement , dans cette famille on regroupe l'ensemble des modes ou états qui sont absolument nécessaires à la production de la valeur ajoutée. Précisons qu'on ne produit pas nécessairement dans tous les modes de cette famille. Il peut s'agir de :

- Procédures préparatoires à la production de la valeur ajoutée
- réglages, tests … nécessaires néanmoins à la production de la valeur ajoutée.

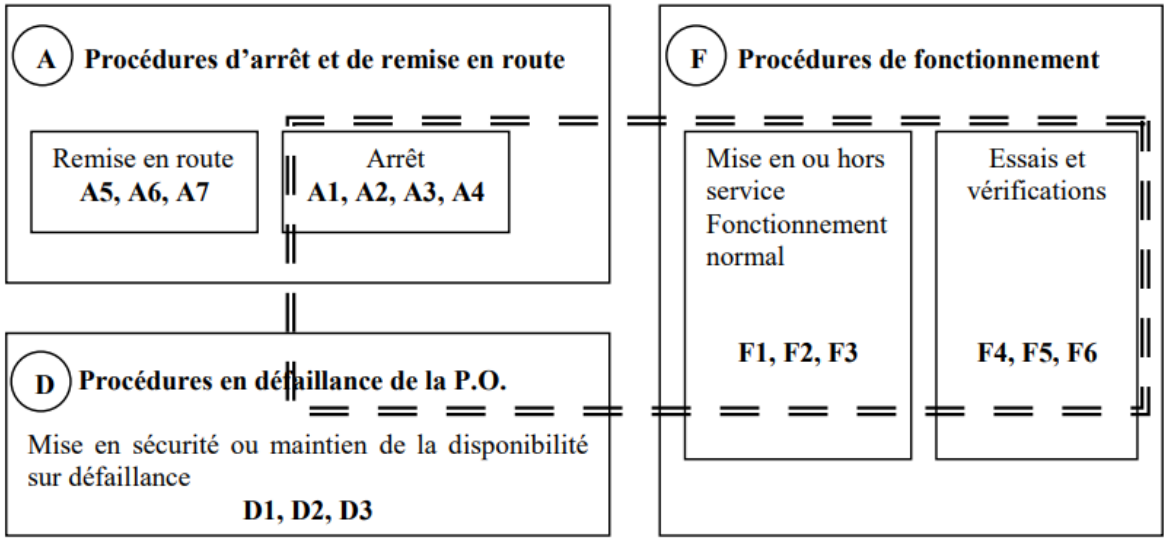


Figure 2.1 : Les familles et les sous-familles de procédures

Une distinction supplémentaire est faite parmi ces trois familles de procédures. On distingue la zone de production de la zone hors production par un double encadrement de la zone de production en pointillés.

2.3 Identification des modes de fonctionnement

2.3.1 Modes de marche

Les différents modes de marche décrits par le guide GEMMA, La famille F, intitulée procédure de fonctionnement, regroupe les états permettant l'exécution des tâches nécessaires à la réalisation de la valeur ajoutée du système (production, test, réglage, etc.). Elle se divise en deux sous-familles principales :

- F1 à F3 : états liés à la mise en service ou à l'arrêt de la production normale.

- F4 à F6 : états dédiés aux opérations de vérification, d'essai ou de test, en dehors de la production normale.

F1 : Mode de production normale
Il s'agit de l'état principal dans lequel le système remplit sa fonction prévue, c'est-à-dire produire. C'est l'état de référence, souvent représenté par le grafcet principal du processus. Ce mode est identifié par un encadrement graphique renforcé dans la représentation GEMMA.

F2 : Mode de préparation à la production
Cet état intervient avant le lancement de la production normale. Il comprend des opérations préliminaires telles que le préchauffage, le remplissage ou la mise en pression, nécessaires au bon démarrage du cycle productif.

F3 : Marche de clôture
Ce mode permet à la machine de terminer proprement un cycle avant un arrêt prolongé. Il peut s'agir de vidanger des circuits, nettoyer certains éléments ou positionner des organes mobiles dans un état sécurisé en fin de série ou de journée.

F4 : Marche de vérification dans le désordre
cet état autorise des essais ou vérifications d'actionneurs de manière indépendante, sans respecter l'ordre du cycle normal. Il est souvent utilisé lors de la maintenance ou lors de tests ponctuels.

F5 : Marche de vérification dans l'ordre
À la différence d'état précédent, celui-ci permet de vérifier les actionneurs du système en suivant précisément le déroulement normal de la production, mais de manière pas à pas. Il peut être utilisé aussi bien en mode production qu'en mode arrêt.

F6 : Marche de teste
destiné aux opérations de test sur les dispositifs de mesure, de contrôle ou de tri. Il permet d'effectuer les réglages ou calibrages nécessaires, souvent de façon périodique, pour garantir la précision des capteurs et instruments. [6]

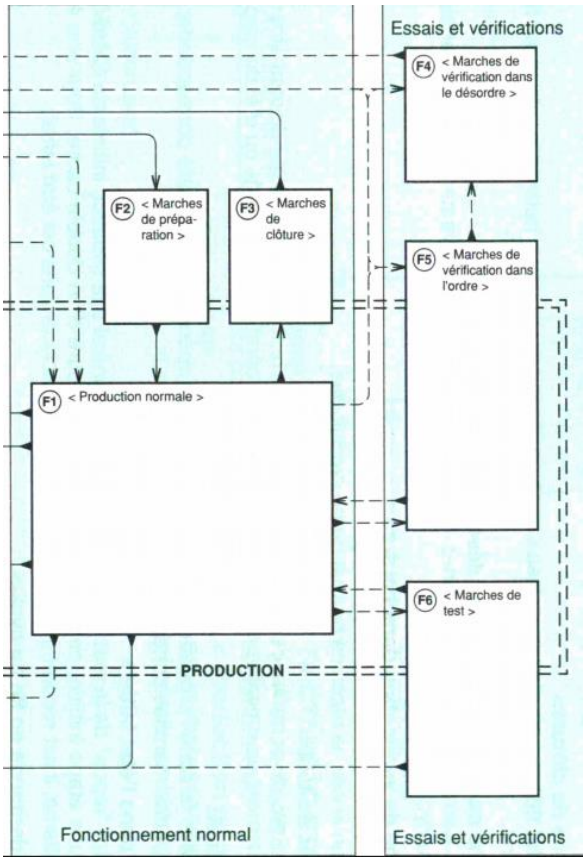


Figure 2.2 : schéma les modes de marches

2.3.2 Modes d'arrêt

A1 : Arrêt dans l'état initial :

Il s'agit de l'état « au repos » de la machine. Il s'agit de l'état dans lequel se trouve la machine avant de passer en mode de production normal. Ce rectangle est signalé sur le GEMMA par un double encadrement qui correspond en général à la situation Initiale du GRAFCET.

Pour une étude encore plus facile de l'automatisme, il est recommandé de représenter la machine dans son état initial.

A2 : Arrêt demandé en fin du cycle

Lorsque l'arrêt est exigé, la machine continue de produire jusqu'à la fin du cycle. A2 est donc un état transitoire vers l'état A1.

A3 : Arrêt demande dans un état déterminé

La machine continue de produire jusqu'à l'arrêt à un état autre que la fin du cycle. C'est un état transitoire vers A4.

A4 : Arrêt obtenu

La machine est alors arrêtée à un état autre que la fin de cycle.

A5 : Préparation pour remise en route

Après défaillance c'est dans cet état que se fait l'ensemble des opérations (dégagements, nettoyages, …) préparatoires à la remise en route après défaillance.

A6 : Mise de la PO dans l'état initial

La machine étant en A6, on remet manuellement et/ou automatiquement la partie opérative en position pour une remise en route à l'état initial.

A7 : Mise de la PO dans un état déterminé

La machine étant en A7, on remet la partie opérative à une position pour une remise en route à un état autre que l'état initial. [8]

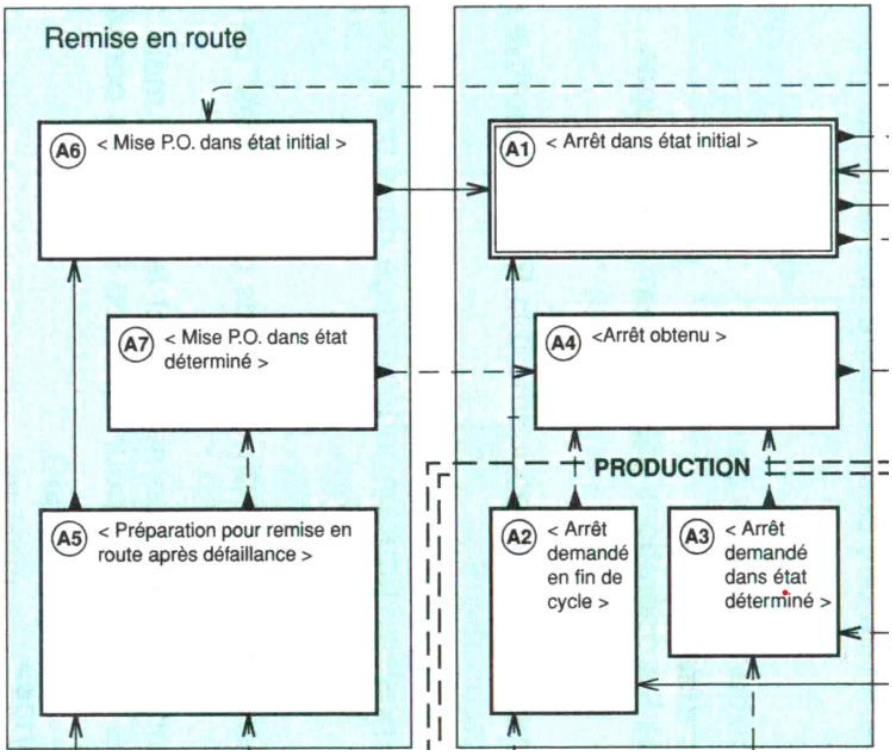


Figure 2.3 : schéma représente les modes d'arrêts

2.3.3 Conditions de transition entre modes

Dans un système automatisé, les transitions entre les différents modes de fonctionnement sont pilotées par des événements précis, qu'ils soient déclenchés automatiquement (par capteurs, temporisations ou séquences programmées) ou manuellement (par un opérateur ou un technicien de maintenance).

Ces transitions doivent être soigneusement définies afin de garantir la continuité de production, la sécurité des opérateurs, la protection des équipements et la maîtrise des situations d'arrêt ou de défaillance.

Les conditions de transition dépendent de l'état courant du système et de l'objectif visé (démarrage, arrêt, test, maintenance, etc.). Elles font partie intégrante de la logique de fonctionnement définie dans le modèle GEMMA, qui structure les états en trois familles : fonctionnement normal (F), arrêt (A) et défaillance (D).

État de départ	État cible	Condition de transition	Commande ou déclencheur
A1 – Arrêt initial	F2 – Préparation	Lancement du système	Ordre opérateur / programme
F2 – Préparation	F1 – Production normale	Fin du préchauffage, remplissage ou réglages	Automate / capteurs
F1 – Production normale	A2 – Arrêt en fin de cycle	Fin de lot ou arrêt programmé	Ordre opérateur
F1 – Production normale	A3 – Arrêt dans un état défini	Demande d'arrêt avant la fin de cycle (entretien, sécurité)	Opérateur / événement sécurité
A2 ou A3	A4 – Arrêt obtenu	Cycle terminé ou position d'arrêt atteinte	Automate / capteurs
A4 – Arrêt obtenu	A5 – Remise en état après défaillance	Intervention requise après anomalie (vidange, nettoyage)	Opérateur
A5 – Remise en état	A6 – Retour à l'état initial	Fin des opérations de remise en état	Fin d'intervention / automate
A6 – État initial rétabli	F2 ou F1	Prêt pour redémarrage	Ordre opérateur / automate
F1 / F2 / F3	D1 – Arrêt d'urgence	Détection d'un danger ou défaillance grave	Capteurs / bouton urgence
D1 – Arrêt d'urgence	D2 – Diagnostic	Intervention de maintenance, sécurisation de l'installation	Opérateur / technicien
D2 – Diagnostic	F1 ou D3	Réparation effectuée ou décision de passer en mode dégradé	Maintenance / opérateur
A1 ou A4	F4 – Vérification désordonnée	Test manuel d'actionneurs sans séquence particulière	Technicien maintenance
A1 ou A4	F5 – Vérification ordonnée	Vérification tâche par tâche selon l'ordre du cycle	Technicien maintenance
A1 ou A4	F6 – Test ou étalonnage	Calibration ou contrôle des capteurs de mesure ou tri	Maintenance

Tableau 2.2 : Tableau récapitulatif des transitions entre modes GEMMA

2.3.4 Modes en cas de défaillance

Dl : Arrêt d'urgence :

C'est l'état pris lors d'un arrêt d'urgence : on y prévoit non seulement les arrêts, mais aussi les cycles de dégagement, les procédures et précautions nécessaires pour éviter ou limiter les conséquences dues à la défaillance.

D2 : Diagnostic et/ou traitement de défaillance :

C’est dans cet état que la machine peut être examinée après défaillance et qu’il peut être apporté un traitement permettant le redémarrage.

D3 : Production tout de même :

Il est parfois nécessaire de continuer la production même après défaillance de la machine. On aura alors une “ production dégradée” ou une “ production forcée ”, ou une production aidé par des opérateurs non prévus en production normale.

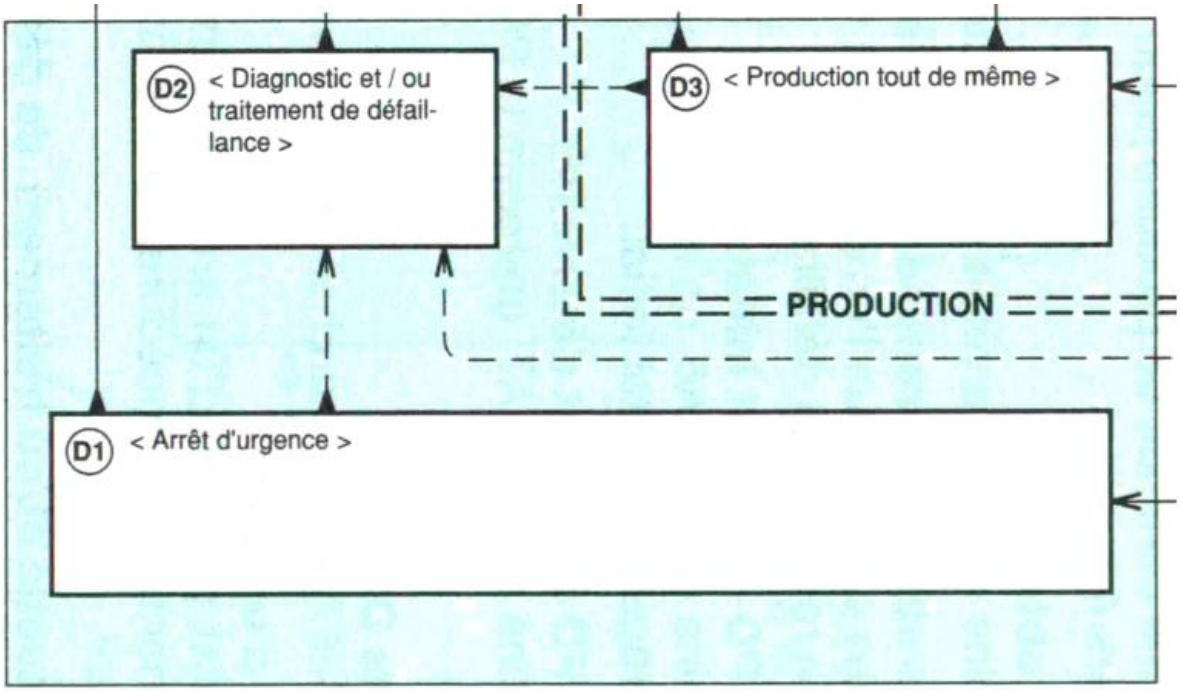


Figure 2.4 : schéma représente le cas de défaillance

2.3.5 Actions associées aux états

Pour chaque état, des actions spécifiques sont exécutées automatiquement ou manuellement. Voici un aperçu :

ÉTAT GEMMA	ACTIONS PRINCIPALES
F1	Chauffage, ventilation, rotation, surveillance capteurs
F2	Montée en température, chargement des bobines
F3	Refroidissement, évacuation des résidus, mise en sécurité
F4	Test manuel des vérins, moteurs, capteurs
F5	Simulation guidée du cycle de séchage
F6	Étapes d’étalonnage, réglage des seuils de mesure
A1	Aucun mouvement, système au repos
A2	Fin de cycle autorisée avant arrêt
A3	Position d’arrêt sécurisée
A4	Système stabilisé, prêt pour intervention ou redémarrage
D1	Coupure générale, arrêt immédiat
D2	Lecture capteurs, journal des défauts, diagnostic visuel
D3	Fonctionnement manuel partiel, assistance opérateur

Tableau 2.3 : actions spécifiques réalisées par le système pour chaque état GEMMA

2.4 Représentation graphique

2.4.1 Graphe GEMMA normalisé

2.4.1.1 Mise en contexte

Dans la pratique industrielle, l'analyse fonctionnelle des automatismes est souvent centrée uniquement sur le cycle de production normal. Cette approche, bien que nécessaire, peut se révéler incomplète si elle ne prend pas en compte les différents modes de fonctionnement, d'arrêt ou de défaillance.
Il arrive fréquemment que certains états ne soient pas identifiés lors de la conception, ce qui mène, une fois la machine installée chez le client, à des dysfonctionnements imprévus. Ces oublis génèrent une insatisfaction de la part de l'utilisateur final et nécessitent des modifications coûteuses et parfois complexes.

Pour éviter ces lacunes, une méthode structurée est recommandée.

Elle repose sur une progression logique de l'analyse du système, en passant d'un niveau purement fonctionnel (cycle de production) à un niveau opérationnel (prise en compte des différents états possibles). Cette progression se décompose généralement comme suit :

2.4.1.2 Démarche progressive vers le GEMMA

Étude du processus d'action : Définition des fonctions essentielles au bon déroulement du processus (actions mécaniques, logiques, temporelles).

GRAFCET de niveau 1 : Description du cycle de production normal sans précision sur la technologie.

Définition de la Partie Opérative (PO) : Choix des capteurs, des actionneurs, et des organes de terrain.

GRAFCET de niveau 2 : Version technologique du GRAFCET prenant en compte la structure physique du système (c'est le GRAFCET opérationnel).

Introduction du GEMMA : À ce stade, on utilise le graphe GEMMA pour sélectionner et modéliser les modes de marche, d'arrêt, et de défaillance.

Cette représentation permet de visualiser l'enchaînement des états du système et d'assurer que toutes les situations de fonctionnement sont bien couvertes.

GRAFCET final : Intégration de tous les éléments (fonctions, transitions entre états, capteurs, pupitre de commande) dans un GRAFCET global validé.

Exemple d'application :

GEMMA d'un système de séchage/teinture Au cours de notre projet de fin d'études, nous avons réalisé un système automatisé de séchage et de teinture de bobines de fil, fonctionnant dans plusieurs phases : remplissage puis extraction puis séchage puis nettoyage puis arrêt. Pour en contrôler les différents modes de fonctionnement, nous avons modélisé ses états en utilisant un graphe GEMMA.

Le schéma ci-dessous présente un extrait du GEMMA, centré sur les phases d'extraction, de séchage et de nettoyage. On y trouve :

- L'identification des états d'arrêt (A1s, A2s, A3s),
- L'identification des modes de marche (F2s : préparation, F1s : production normale, F3s : marche de clôture),
- L'identification des transitions conditionnelles (nombre de cycles, température, validation opérateur), Ainsi que les actions de chaque état (purges, mise sous pression, ouvertures/fermetures de vannes)

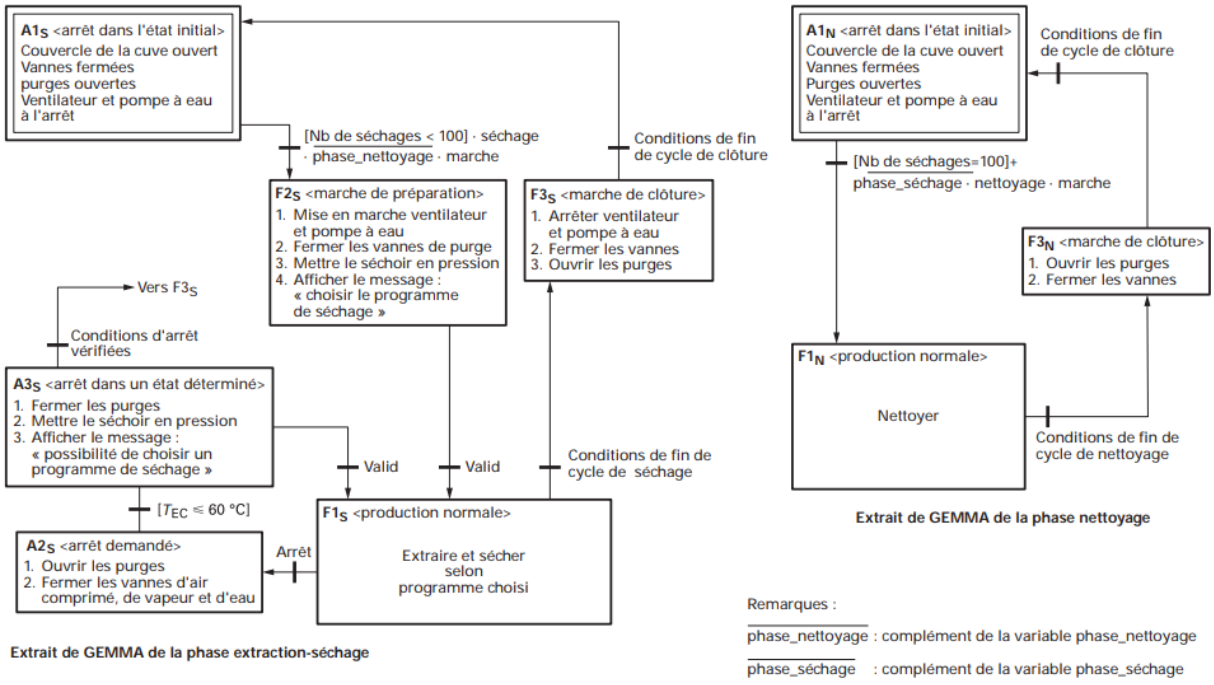


Figure 2.5 : Extraits du GEMMA (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt) de l'installation

Analyse :

- Arrêt initial (A1s) : Le système commence à l'état A1s, où toutes les vannes sont fermées, les purges ouvertes, et les organes dynamiques (pompe, ventilateur) à l'arrêt. C'est l'état de repos sécurisé du système.
- Préparation à la marche (F2s) : Après la sélection du programme de séchage, les actionneurs sont activés : la pompe et le ventilateur sont mis en marche, les purges sont fermées, et le système est mis en pression. L'opérateur valide le démarrage.
- Production normale (F1s) : Durant cette phase, le système exécute le programme de séchage choisi. L'extraction de l'humidité et le maintien des paramètres thermiques sont assurés automatiquement jusqu'à la fin du cycle.
- Conditions de transition vers le nettoyage (phase nettoyage) : Si le nombre de cycles dépasse un seuil critique (par exemple 100), le système entre dans une phase de nettoyage automatique pour éviter l'encrassement. Cette transition permet de préserver les performances et la qualité.
- Nettoyage (F1N, F3N) : Le nettoyage suit un processus similaire, avec des phases spécifiques de marche (activation des purges et rinçage), puis une clôture (fermeture des vannes).

- Arrêt déterminé (A3s) : Lorsque la température descend sous un seuil défini (≤ 60 °C), le système peut revenir à un état d'arrêt contrôlé, permettant à l'opérateur de relancer un nouveau cycle ou de procéder à la maintenance.

Ce GEMMA nous a permis de :

Valider la logique de fonctionnement du système, définir les actions nécessaires à chaque état,

Assurer la cohérence des transitions entre les modes de marche/arrêt/nettoyage, et surtout, de préparer efficacement le passage vers un GRAFCET final en intégrant les interactions avec les capteurs, vannes, moteurs et interfaces opérateurs.

2.4.1.3 Utilité du Graphe GEMMA

Le graphe GEMMA normalisé décrit les états stables du système (rectangles-états) et les transitions entre ces états (flèches).

Il suit une classification précise :

- Famille F : états de fonctionnement (production, préparation, test…)
- Famille A : états d'arrêt normal (initial, fin de cycle…)
- Famille D : états de défaillance (arrêt d'urgence, diagnostic…)

Ce modèle est normé (norme NF E 60-319) et a pour but :

- De mieux cerner le comportement global du système.
- De mettre en évidence les oublis d'état.
- De passer au GRAFCET définitif.
- De programmer et de dépanner le système automatisé.

L'utilisation systématique du GEMMA, après l'expression des besoins, permet donc de fiabiliser la conception et de pallier les oublis graves au moment du démarrage. Il est indispensable pour modéliser les automatismes modernes.

2.4.2 Vérification de la cohérence

L'homogénéité du graphe GEMMA est une des étapes fondamentales qui doit assurer la fiabilité des travaux de modélisation. Un graphe bien construit doit :

Permettre d'atteindre tous les états utiles : Chaque état utile (production, maintenance, arrêt…) doit pouvoir être atteint en partant d'un état initial (généralement A1).

Permettre un retour vers un état stable : Si on doit faire face à un défaut (D1), il doit toujours-être possible de retourner vers A1 ou F1 via le diagnostic (D2) ou alors les dispositions de remise en état (A5/A6).

Éviter les boucles illogiques ou bloquantes : Aucun état ne doit pouvoir conduire à une boucle infinie ou à l'arrêt du système.

Respecter la logique fonctionnelle réelle : Les transitions doivent correspondre à des scénarios réels rencontrés par l'opérateur, comme : arrêt d'urgence, tests, maintenance, nettoyage, etc.

Être relié avec la structure future du GRAFCET final : Chaque état GEMMA devra pouvoir être relié au GRAFCET opérationnel cohérent. [9]

2.5 Étude de scénarios types

L'analyse des scénarios types permet de mieux comprendre le comportement attendu du système dans diverses situations courantes.

À partir du graphe GEMMA, on peut identifier les chemins empruntés par le système selon les événements rencontrés (mise en route, arrêt, défaut, maintenance). Ces scénarios sont essentiels pour valider la logique de commande, anticiper les cas particuliers, et faciliter la programmation.

2.5.1 Démarrage standard :

Correspond au scénario de mise en route habituel : le passage de l'arrêt initial (A1) au mode préparation (F2), puis en production (F1). Démarrage manuel, conditions de sécurité exigées.

2.5.2 Arrêt d'urgence et reprise

Si un ralentissement grave survient, on arrête d'urgence le système (D1), effectue un diagnostic (D2), remet en état (A5, A6), puis on s'engage dans le cycle extraordinaire. Sécurise la tâche en cas de danger.

2.5.3 Passage en mode maintenance

Permet de tester ou de vérifier manuellement les composants sans mettre la production en route. Trois modes sont possibles : F4 (désordonné), F5 (ordonné), F6 (en test/étalonnage). Utilisé par les techniciens.

2.5.4 Gestion des défauts

Si défaut non critique : soit on effectue un diagnostic complet et un redémarrage normal, soit on continue en mode dégradé (D3). Ce mode est temporaire et maintenu au contact d'un opérateur.

2.6 Exploitation de l'analyse GEMMA

L'analyse GEMMA ne se limite pas à une simple représentation des états de marche, d'arrêt et de défaillance d'un système automatisé.

Elle constitue un outil stratégique de conception, mais aussi de conduite, de maintenance et de mise en conformité du système. En tant que méthode d'analyse opérationnelle, elle facilite la transition vers le GRAFCET et contribue à fiabiliser la gestion globale du processus automatisé.

2.6.1 Impacts sur la conduite et la maintenance

L’un des principaux atouts du GEMMA est sa capacité à formaliser tous les états possibles d’un système, y compris les situations exceptionnelles comme les arrêts d’urgence ou les modes de maintenance. Cela permet de :

- Simplifier la conduite du système : les opérateurs peuvent visualiser les différentes situations dans lesquelles se trouve la machine et agir en conséquence.
- Améliorer la maintenance : les états comme D2 (diagnostic) et D3 (production dégradée) sont directement liés aux interventions de maintenance préventive ou corrective.

Prévoir les transitions de retour en sécurité vers la production normale après un défaut (ex : D1 → D2 → A5 → A6 → F1).

Ainsi, l’analyse GEMMA assure une conduite plus fiable et une maintenance plus structurée, en intégrant dès la conception les besoins futurs du système.

2.6.2 Transition vers la modélisation en GRAFCET

Le GEMMA constitue également un prérequis méthodologique essentiel à la création du GRAFCET final. Cette transition se fait en plusieurs étapes :

Chaque rectangle-état du GEMMA correspond à une ou plusieurs étapes du GRAFCET.

Les flèches de transition dans le GEMMA deviennent des réceptivités dans le GRAFCET.

On distingue alors plusieurs GRAFCET spécialisés :

- Le GRAFCET de production normale (GPN),
- Le GRAFCET de conduite (GC),
- Le GRAFCET de sûreté (GS), utile pour les séquences critiques comme les arrêts d’urgence.

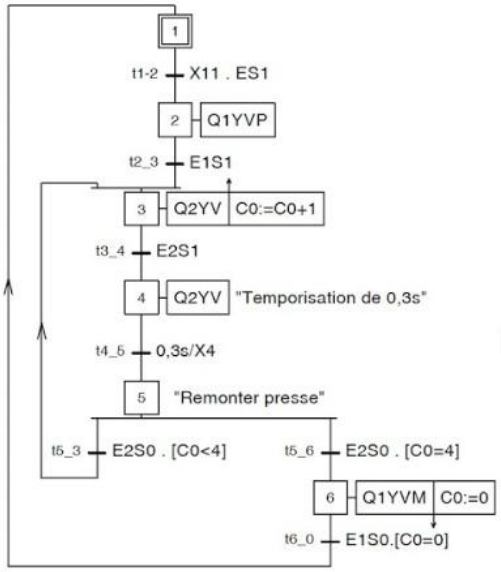


Figure 2.6: représente le GRAPHCET de GS

2.6.3 Recommandations techniques

L'analyse GEMMA permet de formuler plusieurs bonnes pratiques de conception, telles que :

- La présence de capteurs adaptés pour sécuriser les transitions entre états.
- La gestion rigoureuse des arrêts d'urgence (inhibition, figeage, déverrouillage).
- La définition claire des états de sécurité (A5, A6) pour la remise en service.
- L'intégration documentée des modes de maintenance (F4, F5, F6).
- La maîtrise du mode dégradé (D3) pour des cas exceptionnels contrôlés.
- Ces mesures renforcent la sécurité, la fiabilité et la maintenabilité du système.

2.7 Bilan de l'analyse GEMMA

2.7.1 Apports à la compréhension du système

L'analyse GEMMA (Gestion et Maintenance Assistée par Modélisation des Activités) a permis d'améliorer la compréhension des interactions complexes au sein du système analysé. En cartographiant de manière précise les fonctions, les flux et les dysfonctionnements potentiels, cette approche a mis en évidence les points critiques et les zones à risque.

On peut évoquer par exemple qu'elle a permis d'établir clairement les rapports entre le composant matériel et le mode de fonctionnement, facilitant la lecture du système dans son ensemble ,Une compréhension approfondie du système est un préalable indispensable à toute démarche d'amélioration continue.[10]

2.7.2 Aide à la maintenance et à la sécurité

L'analyse GEMMA constitue un élément déterminant de la maintenance préventive et corrective. En permettant l'identification et l'analyse des modes de défaillance et de leurs impacts, elle facilite la hiérarchisation des interventions et la planification des travaux de maintenance.

D'autre part, la méthode facilite l'élaboration de procédures de sécurité adaptées dans la mesure où elle contribue à anticiper les situations à risque et à intégrer les référentiels normatifs.

La maintenance est alors non seulement mieux réalisée mais également plus sûre, limitant ainsi les risques d'accidents et d'arrêts imprévus [11].

2.7.3 Optimisation pour la mise en service

L'analyse GEMMA facilite la mise en service des équipements en permettant la simulation de scénarios et l'analyse des retours d'expérience.

Elle aide à ajuster les réglages et à former les opérateurs, réduisant ainsi les temps d'arrêt initiaux et améliorant la performance dès le démarrage. Son intégration précoce favorise une transition fluide vers une production stable. [12]

2.7.4 Limites et perspectives

Malgré ses bénéfices, GEMMA peut être complexe à appliquer dans des systèmes très vastes

ou dynamiques, demandant un investissement important en temps et ressources, La qualité de l'analyse dépend aussi des données disponibles et de l'engagement des acteurs.

Cependant, avec l'émergence des outils numériques comme GEMMA pourrait gagner en automatisation et efficacité, ouvrant de nouvelles perspectives.

Conclusion :

La méthode GEMMA peut être appliquée efficacement à un système industriel tel que celui de séchage de bobines de fils.

En analysant les différents états de fonctionnement, les transitions, les actions de maintenance et les interventions de sécurité, j'ai pu constater que cette méthode constitue un outil structurant pour l'analyse globale du système. Elle m'a aidé à mieux visualiser le cycle de vie opérationnel, à anticiper les défaillances et à identifier les leviers d'optimisation pour la mise en service.

J'ai également pu observer que GEMMA facilite la formalisation des interactions entre les automatismes et les interventions humaines, ce qui renforce la sécurité, la fiabilité et la maintenabilité du système. Même si cette méthode présente certaines limites, notamment dans les systèmes complexes ou très dynamiques, les perspectives d'évolution restent prometteuses grâce aux outils numériques émergents.

Ainsi, l'analyse GEMMA représente une étape clé dans la compréhension et l'amélioration des systèmes automatisés, en particulier dans un contexte industriel exigeant.

Conclusion générale :

Tout au long de ce mémoire, on a réalisé une analyse du comportement en marche et à l'arrêt d'un système industriel de séchage, sur laquelle s'appuie une méthode de référence dans le domaine de l'automatisme, la méthode GEMMA.

En premier lieu, la présentation du système de séchage a permis d'en décrire son architecture ainsi que le fonctionnement global, ainsi que de présenter les composants matériels et fonctionnels qui le composent.

Cette phase a permis d'acquérir les maturités requis pour la compréhension technique du processus, réunissant et caractérisant les interactions entre les équipements, les automatismes, et les paramètres permettant la régulation.

Dans un second temps, l'utilisation de la méthode GEMMA a permis une agrégation structurée des états de fonctionnement du système, m'a permis d'effectuer un premier décompte des situations de marche, d'arrêt normal et de défaillance, et ce, dans un souci de prise en compte de la sécurité et de la maintenance.

L'analyse a permis d'approfondir la compréhension du comportement dynamique du système, une anticipation des transitions critiques, ainsi qu'une formalisation des décisions d'interaction humaine ou automatique dans chaque situation.

L'approche adoptée dans ce travail montre l'intérêt de combiner une compréhension technique du système avec une méthode d'analyse fonctionnelle rigoureuse. La méthode GEMMA s'est révélée être un outil précieux non seulement pour la conception, mais aussi pour l'optimisation, la fiabilisation et la mise en service d'un système automatisé.

Ce travail ouvre enfin des perspectives d'approfondissement, notamment en intégrant des outils de simulation, de supervision temps réel ou encore des technologies numériques comme les jumeaux numériques, afin d'améliorer la maîtrise globale du cycle de vie du système.

Liste Bibliographie :

[1] Résume des énergies renouvelables Alger (2008) 89-96

[2] Le Goff, P., *Thermique industrielle*, Ellipses, 2017.

[3] Schneider Electric, Guide des automatismes thermiques, 2021

[4] ADEME, Les procédés de séchage dans l'industrie, 2018.

[5] Couenne, F., Génie des procédés industriels, Dunod, 2021.

[6] Cours de Gemma ENISO A.U. : 2011-2012

[7] Schneider Electric, Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt (GEMMA), Documentation technique, 1995.

[8] chapitre 4 Guide d'Etude des Modes Marche et Arrêt (G.E.M.M.A)

[9] Aidoud, H., & Sebbagh, F. (2020). Automatismes industriels – support de cours. Institut National de Formation Supérieure Professionnelle, Département Électrotechnique

10] Bourgeois, P., Lambert, J., & Thomas, C. (2016). Méthodes d'analyse fonctionnelle et de maintenance. Éditions Techniques.

[11] AFNOR (2018). Normes et recommandations pour la maintenance industrielle. Paris : AFNOR Éditions.

[12] Legrand, S. (2020). Optimisation des processus industriels par l'analyse fonctionnelle. Journal of Industrial Engineering, 12(1), 77-88.

Mots-clés

GEMMA : Guide d'Étude des Modes de Marche et d'Arrêt

API : Automate Programmable Industriel

SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition

HMI : Human Machine Interface (Interface Homme-Machine)

GRAFCET : Graphe Fonctionnel de Commande Étape/Transition

PO : Partie Opérative

PC : Partie Commande

GFN : Grafcet de Fonctionnement Normal

A, D, F : Familles de modes GEMMA :

- A = Arrêts
- D = Défaillances
- F = Fonctionnement (marche)