الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقـراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Universitéd'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de sécurité industrielle et environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance de l'automatisme et de l'instrumentation

Thème

Etude, Automatisation et simulation d'un système industriel via FACTORY I/O

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom Prénom

CHALABI ABDELDJALIL & CHERGUI ABDELMALEK

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Titah Mouloud	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	**Président**
Belhadri Kheira	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	**Examinateur**
Herarsi Nour el Houda	MA	Univ. Oran-2, IMSI	**Encadreur**

Année 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'études

A ma mère

Je dédie ce mémoire de fin d'études à ma mère, la mère aimante qui a illuminé ma vie et qui m'a toujours guidé avec sagesse et tendresse. À travers les hauts et les bas, tu as été mon soutien, ma force et ma lumière. Tu m'as appris la valeur du courage, du travail et de l'amour, et tu as toujours été fière de moi. Par ces mots empreints de gratitude, je tiens à te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. J'implore Dieu Tout-Puissant de t'accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

A mon père

Toute l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Tu as toujours été pour moi une école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Malgré les circonstances difficiles que tu as vécues, mon père, tu n'as jamais cessé de me soutenir, de m'encourager et de me montrer le chemin du courage et du travail. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as faits ainsi que de l'encouragement et du soutien constants que tu m'as toujours apportés. Par ces quelques mots, je tiens à t'exprimer toute ma gratitude. J'implore Dieu Tout-Puissant de t'accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

A notre encadreur

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, Mme ***Herarsi Nour el Houda****, pour son accompagnement, ses orientations précieuses et le temps qu'elle nous a consacré tout au long de la réalisation de ce travail. Ses conseils et son soutien nous ont été d'une grande aide pour mener à bien ce projet.*

A mes amis proches

À mes chers amis Benaouda Beddiar, Brahim Abdelhak, Boualem Youcef, Draou Hanaa et Mezouaghi Wail, je vous remercie sincèrement pour votre encouragement et votre soutien tout au long de mon parcours. Je vous souhaite beaucoup de réussite, de bonheur et de succès dans votre vie.

A toute ma famille et mes proches

Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi, merci pour vos encouragements et votre soutien.

***M.** Chergui Abdelmalek et*
***M.** Chalabi Abdeldjalil*

Remerciements

Ce projet n'aurait pas vu le jour sans la volonté et la bénédiction de Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force et le courage pour mener à bien ce travail.

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur, Mme.**Herarsi Nour el Houda,** pour ses conseils précieux, son orientation et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail. Nous la remercions également pour sa disponibilité et son soutien constant.*

A notre président, M.Titah Mouloud

*Nous exprimons également notre profonde gratitude à la présidente du jury, M.**Titah Mouloud**, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider ce jury.*

Notre plus chaleureux remerciement à notre examinateur Mme.Belhadri Kheira

*Nos remerciements s'adressent aussi à notre examinatrice, Mme.**Belhadri Kheira**, pour avoir accepté d'évaluer notre travail et de participer à notre soutenance.*

Nous tenons aussi à remercier tous nos enseignants du département pour la qualité de leur enseignement et leurs efforts tout au long de notre parcours universitaire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ingénieur pour son aide, ses conseils et les connaissances qu'il nous a transmises durant notre stage.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont également à nos parents, à notre famille et à nos amis pour leur soutien, leur encouragement et leur confiance.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE I

REMERCIEMENTS II

LISTE DES FIGURES VI

LISTE DES TABLEAU IX

NOMENCLATURE X

INTRODUCTION GENERALE XII

I Industrie 4.0, Gestion et Simulation de Flux

I.1 Introduction 1
I.2 L'industrie 4.0 2
I.2.1 Concepts de l'Industrie 4.0 2
I.2.2 Enjeux de l'Industrie 4.0 2
I.2.3 Piliers technologiques de l'Industrie 4.0 3
I.3 La gestion et la simulation des flux dans l'industrie 4
I.4 État de l'art sur la simulation des flux de production 5
I.5 Définition de la simulation de flux 6
I.6 Types de simulation de flux 7
I.6.1 Simulation de flux de production 7
I.6.2 Simulation des flux logistiques 7
I.6.3 Simulation des flux de fluides 7
I.6.4 Simulation des flux dans les réseaux informatiques 8
I.7 Principaux outils de simulation des flux de production 8
I.7.1 FlexSim 8
I.7.2 CIROS 9
I.7.3 Plant Simulation 10
I.7.4 Arena 11
I.7.5 AnyLogic 11
I.7.6 Factory I/O 12
I.8 Les avantages de la simulation de flux 13
I.8.1 Optimisation des processus 13
I.8.2 Réduction des coûts 13
I.8.3 Prise de décision stratégique 13
I.8.4 Sécurisation et fiabilité des systèmes 13
I.9 Positionnement et originalité du travail 14
I.10 Conclusion 14

II Etude et Description du Système de tri automatisé

II.1 Introduction 16
II.2 Présentation générale des systèmes de tri automatisés 17
II.2.1 Principe de fonctionnement des systèmes de tri automatisés 17
II.2.2 Composants principaux d'un système de tri automatisé 17
II.2.3 Types de systèmes de tri automatisés 18
II.3 Description détaillée du système de tri étudié 18
II.3.1 Présentation Générale 19
II.3.2 Activités et Produits 19
II.3.3 Secteurs d'Application 20
II.3.4 Processus du fonctionnement général du l'entreprise 20
II.3.5 Processus de fonctionnement ' Triage' 27
II.4 Critère de choix du système 29
II.5 L'objective attendus du travail 29
II.6 Présentation des outils et technologies utilisés 30
II.6.1 Les systèmes automatisés de production (SAP) 30
II.6.2 Automate programmable industriel (API) 33
II.6.3 Langages de programmation 36
II.6.4 Comparaison entre les langages de programmation 39
II.6.5 Choix de l'API 40
II.7 Logiciels de programmation (logiciel choisi : TIA Portal) 41
II.8 Logiciels de simulation de flux (logiciel choisi Factory I/O) 48
II.9 Logiciels de supervision et d'interfaçage 50
II.10 Objectif à atteindre 53
II.11 Conclusion 54

III Automatisation et simulation sous FACTORY I/O et NODE-RED

III.1 Introduction 55
III.2 Objective de travail 56
III.3 Méthodologie de travail 56
III.4 Description fonctionnelle détaillée du système de tri 57
III.5 Organigramme générale de fonctionnement 58
III.6 Programmation du Station par TIA portal 59
III.6.1 Choix de l'API 59
III.6.2 Identification et configuration des modules d'entrées/sorties 59
III.6.3 Présentation des blocs programmés 60
III.6.4 Table des variables (Entrées / sorties) 61
III.6.5 Automatisation de la station (Programme Ladder) 62
III.7 Simulation sous FACTORY I/O 86
III.8 Commande et visualisation des lots via NODE-RED 93
III.9 Discussions des résultats obtenus 103

III.10 Perspectives 104
III.11 Conclusion 105
CONCLUSION GENERALE **XIV**
RÉSUMÉ **XV**
ANNEXES **XVI**
BIBLIOGRAPHIE **XVII**

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 : Exemple de modèle 3D du système physique 9
- Figure I.2 : CIROS Education 9
- Figure I.3 : Logiciel Plant Simulation 11
- Figure I.4: FACTORY I/O 12
- Figure II.1: Logo El Kader Plast 19
- Figure II.2 : Décharge de déchets plastiques 20
- Figure II.3 : Déchiqueteur 21
- Figure II.4 : Plastique déchiqueter 21
- Figure II.5 : Cuves d'eau 22
- Figure II.6 : Vue intérieure de cuves 22
- Figure II.7 : Souffleur 23
- Figure II.8 : Elévateur 23
- Figure II.9 : Station de triage par couleur automatise 24
- Figure II.10 : Résistance 24
- Figure II.11 : Refroidissement de filaments de plastique 25
- Figure II.12 : Operation de suchage 25
- Figure II.13 : Opération de granulation 26
- Figure II.14 : Le moule 26
- Figure II.15 : Produit finale 27
- Figure II.16 : Schéma synoptique du système de tri automatisé par couleurs (API + vérin) 27
- Figure II.17 : API Compact 34
- Figure II.18 : API Modulaire 34
- Figure II.19 : Siemens S7-1200 35
- Figure II.20 : Le langage LADDER 38
- Figure II.21 : Le langage SCL 38
- Figure II.22 : Le langage grafcet 39
- Figure II.23: Simens S7-1500 40
- Figure II.24: Vue de portail 43
- Figure II.25: Vue de projet 43
- Figure II.26: Table de variables 46
- Figure II.27: Blocs de programmation 46
- Figure II.28: Factory I/O logo 48
- Figure II.29: Digital twin concept 48
- Figure II.30: Le flux de Factory I/O 49
- Figure II.31: S7-PLCSIM V13-19 49
- Figure II.32: NODE-RED logo 51
- Figure II.33: Les nœuds de NODE-RED 51
- Figure II.34: Exemple d'un flux NODE-RED 52
- Figure II.35: Exemple d'une table de bord NODE-RED 52
- Figure III.1: Organigramme général du système de la station de tri 58
- Figure III.2: Choix le CPU 59
- Figure III.3: Illustre l'appareil 60
- Figure III.4: Structure du projet PLC – Station de tri 60
- Figure III.5: Table des variables de l'API – Partie 1 61
- Figure III.6: Table des variables de l'API – Partie 2 61

- Figure III.7 : Table des variables de l'API – Partie 3 62
- Figure III.8 : Initialisation et liaison TIA Portal – Factory I/O 63
- Figure III.9 : Logique de contrôle du fonctionnement global du système 63
- Figure III.10 : Gestion du démarrage, de l'arrêt et des feux de signalisation 64
- Figure III.11 : Gestion du démarrage, de l'arrêt et des feux de signalisation (la suite) 64
- Figure III.12 : Gestion des feux de signalisation (Vert, Rouge, Jaune) 65
- Figure III.13 : Activation des convoyeurs via condition générale (CN) 66
- Figure III.14 : Activation des convoyeurs via condition générale (CN) - (la suite) 67
- Figure III.15 : Gestion des mécanismes de retrait des pièces 68
- Figure III.16 : Gestion automatique des vérins de tri (Pusher) 69
- Figure III.17 : Logique de pilotage du vérin (Pusher 01) 69
- Figure III.18 : Logique de pilotage du vérin (Pusher 02) 70
- Figure III.19 : Logique de pilotage du vérin (Pusher 03) 71
- Figure III.20 : Gestion du démarrage/arrêt de (émetteur/Retirer) 72
- Figure III.21 : Logique de pilotage de l'émetteur principal 72
- Figure III.22 : Génération d'une boîte bleue pour chaque 2 pièces produites 73
- Figure III.23 : Compteur des pièces bleues 73
- Figure III.24 : Génération d'une boîte Verte pour chaque 2 pièces produites 73
- Figure III.25 : Compteur des pièces Vertes 74
- Figure III.26 : Génération d'une boîte métallique pour chaque 2 pièces produites 74
- Figure III.27 : Compteur des pièces métalliques 74
- Figure III.28 : Comptage des pièces selon leur destination 75
- Figure III.29 : Compteur des pièces bleues avec gestion du Reset 76
- Figure III.30 : Compteur des pièces Vertes avec gestion du Reset 76
- Figure III.31 : Compteur des pièces métalliques avec gestion du Reset 76
- Figure III.32 : Compteur des pièces non définies avec gestion du Reset 77
- Figure III.33 : Compteur total des pièces (CTU) 77
- Figure III.34 : Addition des capteurs – Total des pièces 78
- Figure III.35 : Système d'affichage des quantités produites 79
- Figure III.36 : Comptage global des pièces et transfert des valeurs vers les variables d'affichage 79
- Figure III.37 : Comptage global des pièces et transfert des valeurs vers les variables d'affichage (la suite) 80
- Figure III.38 : Arrêt automatique de la production après atteinte des quantités demandées 81
- Figure III.39 : Arrêt du système en fin de production 81
- Figure III.40 : Arrêt du système en fin de production (la suite) 82
- Figure III.41 : Bloc fonctionnel de commande du robot 83
- Figure III.42 : Commande de démarrage, arrêt et réinitialisation du centre d'usinage 83
- Figure III.43 : Bloc de gestion des alarmes de production 84
- Figure III.44 : Gestion des alarmes de production 84
- Figure III.45 : Gestion des alarmes de production (la suite) 85
- Figure III.46 : Modèle 3D de la station de tri sous Factory I/O 86
- Figure III.47 : Configuration du Driver Siemens S7-1200/1500 dans Factory I/O 86
- Figure III.48 : Configuration du Driver Siemens S7-1200/1500 dans Factory I/O (la suite) 87
- Figure III.49 : Panneau de commande 88
- Figure III.50 : Position des capteurs dans la station de tri 90
- Figure III.51 : Position des capteurs dans la station de tri (la suite) 90
- Figure III.52 : Positionnement des actionneurs dans le système 92
- Figure III.53 : Positionnement des actionneurs dans le système (la suite) 92
- Figure III.54 : Positionnement des actionneurs dans le système (la suite) 93

- Figure III.55 : Fonctionnement du système de tri selon la couleur et la nature de la pièce 93
- Figure III.56 : Gestion de l'authentification sous Node-RED 93
- Figure III.57 : Interface de pilotage du système (Start – Stop – Reset) 94
- Figure III.58 : Gestion de la production et suivi des pièces bleues 95
- Figure III.59 : Gestion de la production et suivi des pièces vertes 96
- Figure III.60 : Gestion de la production et suivi des pièces métalliques 97
- Figure III.61 : Analyse comparative entre la production réalisée et les objectifs fixés 98
- Figure III.62 : Système global de supervision des équipements et capteurs de la station de tri 99
- Figure III.63 : Système global de supervision des équipements et capteurs de la station de tri (la suite) ... 100
- Figure III.64 : Système global de supervision des équipements et capteurs de la station de tri (la suite) ... 100
- Figure III.65 : Interface d'authentification du système de supervision 102
- Figure III.66 : Tableau de bord de production et de contrôle du système 102
- Figure III.67 : Interface de supervision de l'état du système et des équipements 103
- Figure III.68 : Interface de supervision et de contrôle du système de tri sous Node-RED 103

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau II.1 : Critère de choix 29
- Tableau II. 2 : Les marques des API 35
- Tableau II. 3 : Les langages de programmation 39
- Tableau II. 4 : Les fonctionnalités utilisées ‘ Factory I/O ‘ 50
- Tableau III.1: Structure de panneau de commande 87
- Tableau III.2: Les capteurs de la station de tri 89
- Tableau III.3: les actionneurs de la station de tri 92

NOMENCLATURE

- **API / PLC :** Automate Programmable Industriel.
- **CPU :** Unité Centrale de Traitement.
- **DI :** Entrée Numérique (Digital Input).
- **DQ / DO :** Sortie Numérique (Digital Output).
- **I :** Adresse d'entrée.
- **Q :** Adresse de sortie.
- **M :** Mémoire interne.
- **DB :** Data Block (Bloc de données).
- **FB :** Function Block (Bloc fonctionnel).
- **FC :** Function (Fonction).
- **LAD :** Ladder (Langage de programmation graphique).
- **TON :** Temporisateur à l'enclenchement.
- **CTU :** Compteur ascendant.
- **PV :** Valeur préréglée (Preset Value).
- **CV :** Valeur actuelle du compteur.
- **HMI :** Interface Homme-Machine.
- **MQTT :** Protocole de communication IoT.
- **OPC / OPC UA :** Open Platform Communications (protocole de communication industrielle sécurisé).
- **CN :** Condition générale du système.
- **NR :** Commande via Node-RED.
- **AR :** Réalité Augmentée.
- **IA :** Intelligence Artificielle.
- **IoT :** Internet des Objets (Internet of Things).
- **IIoT :** Internet Industriel des Objets.
- **Cloud :** Technologie de stockage et de traitement des données à distance.
- **Big Data :** Ensemble de données massives nécessitant des outils d'analyse avancés.
- **CPS :** Cyber-Physical Systems (Systèmes cyber-physiques).
- **GTA :** Germany Trade and Invest.
- **SCL :** Structured Control Language
- **SAP :** Systèmes Automatisés de Production
- **PO :** Partie Opérative
- **PP :** Polypropylène
- **PEHD :** Polyéthylène Haute Densité

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un contexte industriel marqué par la transformation numérique et l'émergence de l'**Industrie 4.0**, les systèmes de production évoluent vers des environnements de plus en plus intelligents, connectés et autonomes. Cette mutation technologique repose sur l'intégration de concepts avancés tels que les systèmes cyber-physiques, l'Internet Industriel des Objets (**IIoT**) et l'exploitation du Big Data. Ces leviers permettent non seulement d'optimiser la performance opérationnelle, mais aussi d'accroître la flexibilité des processus industriels face aux exigences changeantes du marché [13].

Au cœur de cette transformation, la gestion et la simulation des flux de production s'imposent comme des outils d'aide à la décision stratégiques. La simulation, en particulier, offre la possibilité de modéliser, d'analyser et d'optimiser les processus de manière virtuelle sans perturber le système réel, minimisant ainsi les risques techniques et financiers [3].

S'inscrivant dans cette dynamique, le présent mémoire porte sur l'étude, l'automatisation et la supervision d'un **système de tri industriel**. L'objectif central est de concevoir une architecture performante capable d'assurer le tri automatique d'objets selon leur colorimétrie, tout en garantissant des impératifs de précision, de rapidité et de fiabilité. Pour répondre à cette problématique, notre démarche s'appuie sur une approche intégrée combinant trois piliers technologiques :

- La commande logique via un **Automate Programmable Industriel (API)** ;
- La validation comportementale par la simulation 3D sous l'environnement **Factory I/O** ;
- La supervision en temps réel et l'interfaçage de données à l'aide de l'outil **Node-RED**.

Cette méthodologie, axée sur le concept de **jumeau numérique**, permet de valider le comportement du système dans un environnement virtuel avant sa mise en œuvre physique. Une telle démarche contribue significativement à la réduction des coûts de développement, à l'amélioration de la qualité de conception et au renforcement de la sécurité des installations industrielles [31].

Afin de répondre aux objectifs fixés, ce mémoire est structuré en deux parties principales (théorique et pratique) réparties sur trois chapitres :

- **Le Chapitre 1** pose le cadre théorique en présentant l'**Industrie 4.0**, ainsi que les concepts fondamentaux liés à la **gestion et à la simulation des flux** de production dans les environnements automatisés.
- **Le Chapitre 2** est dédié à l'**étude et à la description technique du système de tri automatisé**. Nous y détaillons le cahier des charges, l'architecture matérielle et le choix des composants (capteurs et actionneurs).
- **Le Chapitre 3** constitue le cœur de la partie pratique. Il porte sur l'**automatisation et la simulation sous Factory I/O**, incluant la programmation de la logique de commande (API), l'interfaçage avec Node-RED et la validation du système par le jumeau numérique.

Chapitre I : Industrie 4.0, Gestion et Simulation de Flux

I.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies numériques et l'émergence du concept d'Industrie 4.0 ont profondément transformé les systèmes industriels modernes. Les entreprises cherchent aujourd'hui à accroître leur performance, leur flexibilité et leur capacité d'adaptation face à une demande en constante évolution. Dans ce contexte, la compréhension et la maîtrise des flux — qu'ils soient physiques, informationnels ou décisionnels — constituent un enjeu majeur pour assurer une production optimale et durable.

La simulation des flux de production s'impose alors comme un outil incontournable pour analyser, concevoir et optimiser les systèmes industriels. Elle permet d'expérimenter virtuellement différents scénarios, de détecter les sources d'inefficacité et de soutenir la prise de décision sans perturber le système réel. Avec l'apparition d'outils performants tels que FlexSim, Arena, AnyLogic, Plant Simulation ou Factory I/O, la simulation est devenue accessible, précise et largement intégrée dans les processus d'ingénierie.

Ce chapitre présente dans un premier temps les concepts fondamentaux de l'Industrie 4.0 ainsi que ses enjeux et piliers technologiques. Il s'intéresse ensuite à la gestion et à la simulation des flux dans les environnements industriels, avant de proposer un état de l'art des approches de simulation utilisées pour modéliser les systèmes de production. Les différents outils logiciels seront également introduits afin de mettre en évidence leurs spécificités et domaines d'application.

Enfin, ce chapitre se termine par le positionnement et l'originalité du travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, montrant en quoi l'étude, l'automatisation et la simulation d'un système industriel via Factory I/O s'inscrivent pleinement dans les exigences et les évolutions de l'Industrie 4.0.

I.2 L'industrie 4.0

I.2.1 Concepts de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 constitue la quatrième révolution industrielle, marquée par l'intégration massive des technologies numériques dans les processus de fabrication. Elle repose sur la convergence entre le monde physique et le monde numérique à travers des systèmes interconnectés, intelligents et capables d'agir de manière autonome. Parmi ses concepts fondamentaux, on retrouve la numérisation, la connectivité, l'analyse des données, l'automatisation avancée et la prise de décision en temps réel.

L'objectif principal de cette révolution est d'atteindre une production plus flexible, plus performante et plus économique, capable de s'adapter rapidement aux exigences d'un marché en constante évolution. Elle renforce également la collaboration entre entreprises, fournisseurs et clients au sein d'un écosystème digital intégré. Selon Germany Trade and Invest (GTAI), l'Industrie 4.0 marque une rupture profonde avec les modèles traditionnels en introduisant des systèmes capables de communiquer, d'apprendre et d'optimiser automatiquement leur fonctionnement grâce aux technologies intelligentes [1].

I.2.2 Enjeux de l'Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 soulève plusieurs enjeux majeurs. Le premier concerne l'amélioration de la performance industrielle, rendue possible grâce à l'automatisation avancée, à la maintenance prédictive et à l'optimisation continue des processus, telles que décrites dans les travaux consacrés à l'impact de l'IA et de la robotique sur la performance industrielle [1]. Elle répond également à l'enjeu de flexibilité, offrant la capacité d'adapter rapidement les systèmes de production aux variations de la demande et de permettre une personnalisation accrue des produits, ce qui constitue l'un des fondements de la production intelligente [6].

Un autre enjeu essentiel est la gestion et l'exploitation des données massives générées par les capteurs et les systèmes intelligents. Le Big Data joue ici un rôle central, nécessitant des outils puissants d'analyse pour soutenir la prise de décision en temps réel [3]. Parallèlement, l'augmentation de la connectivité industrielle introduit un enjeu majeur de cybersécurité, car les systèmes deviennent plus vulnérables aux attaques numériques, obligeant les entreprises à renforcer leurs mécanismes de protection et de résilience [9].

Enfin, la transition vers l'Industrie 4.0 implique un enjeu organisationnel important lié à l'évolution des compétences humaines. Les opérateurs et techniciens doivent désormais maîtriser des technologies numériques avancées et apprendre à collaborer avec des systèmes hautement automatisés, une transformation déjà soulignée dans plusieurs études portant sur l'intégration de l'Industrie 4.0 dans les environnements industriels [6].

I.2.3 Piliers technologiques de l'Industrie 4.0

- **Big Data**

Le Big Data désigne des volumes massifs de données difficiles à traiter avec des systèmes classiques [3]. Leur analyse en continu permet d'améliorer la qualité, d'anticiper les défaillances et de soutenir la prise de décision.

- **Systèmes cyber-physiques (CPS)**

Les CPS assurent l'interface entre systèmes numériques et processus physiques. Ils captent, traitent et échangent des données en temps réel pour piloter les opérations industrielles [4].

- **Internet Industriel des Objets (IIoT)**

L'IIoT connecte des milliers de capteurs et dispositifs intelligents capables d'échanger des informations, rendant possible une automatisation avancée [5].

- **Intelligence artificielle (IA)**

L'IA permet la reconnaissance d'anomalies, la maintenance prédictive, l'optimisation de la production et la prise de décision intelligente [1].

- **Robots autonomes et collaboratifs (Cobots)**

Ces robots sont flexibles, intelligents et capables d'interagir en toute sécurité avec les opérateurs humains [2].

- **Fabrication additive (Impression 3D)**

Elle permet la production rapide de pièces complexes et personnalisées tout en réduisant les coûts [6].

- **Réalité augmentée (AR)**

Elle offre des outils de visualisation et de formation avancés, facilitant la maintenance et le développement des jumeaux numériques [8].

- **Cybersécurité**

La connectivité accrue exige des systèmes robustes pour protéger les données et garantir la disponibilité des infrastructures industrielles [9].

- **Cloud computing**

Le cloud fournit des ressources de stockage et de calcul évolutives, facilitant l'analyse des données et la collaboration numérique [7].

- **Simulation et jumeaux numériques**

La simulation 3D permet de représenter virtuellement les systèmes physiques, d'optimiser leur fonctionnement et de réduire les risques lors de la mise en service [2].

En combinant ces technologies, l'Industrie 4.0 donne naissance à des Smart Factories, capables d'auto-optimisation, d'auto-diagnostic et d'adaptation dynamique aux conditions réelles de production.

I.3 La gestion et la simulation des flux dans l'industrie

En La gestion des flux dans l'industrie vise à organiser et optimiser la circulation des matières, des informations et des ressources au sein d'un système de production afin d'assurer une performance optimale. Elle permet de réduire les temps d'attente, d'éviter les goulots d'étranglement et d'améliorer la coordination entre les différentes étapes du processus industriel.

Dans ce contexte, la simulation des flux constitue un outil indispensable permettant de reproduire virtuellement le comportement d'un système réel. Elle offre la possibilité d'évaluer différents scénarios, de détecter les inefficacités, et de tester des solutions avant leur mise en œuvre physique, réduisant ainsi les coûts et les risques associés aux modifications industrielles. Les travaux récents sur la modélisation numérique des systèmes de production montrent que la simulation contribue fortement à l'optimisation et à la prise de décision [3].

Plusieurs outils de simulation sont aujourd'hui utilisés dans l'industrie pour analyser les flux, tels que FlexSim, Factory I/O, ou encore CIROS, permettant de modéliser les postes de travail, les temps de cycle, la consommation des ressources et le comportement dynamique des systèmes automatisés. Par exemple, FlexSim est largement employé dans le cadre de la création de jumeaux numériques.

L'intégration de la gestion des flux et de la simulation s'inscrit pleinement dans la logique de l'Industrie 4.0, où les systèmes cyber-physiques, l'Internet Industriel des Objets (IIoT) et les jumeaux numériques jouent un rôle central dans la synchronisation, l'optimisation et la supervision intelligente des processus de production [9], [4]. Ces technologies permettent une collecte continue de données, leur traitement en temps réel et leur exploitation pour prédire les pannes, améliorer la qualité et renforcer la flexibilité du système.

Ainsi, la combinaison d'une gestion efficace des flux et de la simulation avancée représente un levier majeur pour moderniser les systèmes industriels et répondre aux exigences croissantes de performance, d'agilité et de compétitivité.

I.4 État de l'art sur la simulation des flux de production

La simulation des flux de production occupe une place centrale dans l'analyse, la conception et l'optimisation des systèmes industriels. Les premières approches étaient fondées sur la modélisation à événements discrets, permettant de représenter le fonctionnement d'un atelier en intégrant files d'attente, temps de traitement et ressources. Cette approche, toujours largement utilisée, a été décrite dans de nombreux travaux sur la simulation et l'optimisation des systèmes de production [3], [11].

Avec l'évolution des besoins industriels, la simulation s'est progressivement enrichie grâce à des outils dédiés tels que FlexSim, Arena, AnyLogic ou Plant Simulation, offrant des environnements 2D et 3D plus intuitifs, des bibliothèques d'objets industriels et des capacités avancées d'analyse statistique [5]. Ces outils permettent de comparer différents scénarios, d'identifier les goulots d'étranglement et de soutenir la prise de décision avant la mise en œuvre réelle.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, la simulation connaît une transformation majeure grâce à l'intégration de l'Internet Industriel des Objets (IIoT), des systèmes cyber-physiques (CPS) et du Big Data [4]. Cette évolution a donné naissance au concept de jumeau numérique, un modèle virtuel connecté en temps réel au système physique, permettant d'anticiper les défaillances, optimiser les flux et améliorer la performance globale [9].

Les recherches récentes montrent également l'émergence d'approches hybrides combinant modélisation à événements discrets, dynamique des systèmes et simulation multi-agents. Ces méthodes permettent de représenter plus fidèlement les interactions complexes entre machines, opérateurs et flux logistiques dans des environnements industriels modernes [4].

Enfin, l'apparition d'outils immersifs comme Factory I/O a renforcé l'utilisation de la simulation dans l'apprentissage, la validation et la mise au point des systèmes automatisés. Ces plateformes offrent une représentation réaliste des environnements industriels et facilitent la transition vers des solutions intégrant la logique automate, les capteurs et les actionneurs, comme l'ont montré plusieurs travaux consacrés aux environnements virtuels de formation industrielle [2].

Ainsi, l'état de l'art met en évidence que la simulation des flux de production n'est plus un simple outil d'analyse, mais un levier stratégique pour concevoir, optimiser et piloter des systèmes industriels flexibles, performants et intelligents, répondant aux objectifs de l'Industrie 4.0.

I.5 Définition de la simulation de flux

La simulation des flux de production repose sur la création d'un modèle représentant un système réel et sur son utilisation expérimentale pour analyser un problème spécifique. Ce modèle vise à reproduire le fonctionnement du système étudié, permettant ainsi d'observer

son comportement dynamique et d'anticiper ses évolutions futures. Elle est principalement employée pour examiner les flux physiques (pièces, matière, équipements, etc.) et informationnels (ordres de fabrication, kanban, etc.) au sein d'un atelier, ainsi que la disponibilité des ressources (opérateurs, machines, convoyeurs, etc.).

Cependant, la simulation ne fournit pas directement une solution optimale aux problématiques de production. Elle fonctionne plutôt comme une « boîte noire » qui réagit aux paramètres d'entrée définis, sans être capable d'en déterminer automatiquement la valeur optimale. Son utilité principale réside dans l'évaluation et la comparaison de différents scénarios afin d'anticiper les impacts des changements physiques ou décisionnels avant leur mise en œuvre.

Les modèles de simulation permettent de représenter un système avec un niveau de détail et de précision adapté aux exigences du problème étudié. Cette représentation inclut non seulement les aspects physiques de l'atelier, mais également certains éléments du système de gestion de production.

I.6 Types de simulation de flux

I.6.1 Simulation de flux de production

Dans l'industrie, la simulation des flux est un outil clé pour analyser et améliorer les chaînes de production. Chaque étape, de l'approvisionnement en matières premières à la livraison des produits finis, repose sur des flux de matériaux, de ressources et d'informations qui doivent être bien gérés pour éviter les inefficacités [2]. Grâce aux logiciels de simulation, il est possible de représenter ces flux de manière visuelle et d'identifier les éventuels points de blocage, retards ou gaspillages. Ces outils permettent aussi d'expérimenter différentes configurations de production, d'évaluer l'impact de l'ajout de nouvelles machines ou encore d'optimiser l'organisation des équipements [2].

I.6.2 Simulation des flux logistiques

Dans le domaine de la logistique et de la gestion des chaînes d'approvisionnement, la simulation des flux joue un rôle clé pour optimiser les opérations. La circulation des produits, des pièces ou encore des informations entre les différents acteurs d'une supply chain doit être gérée avec précision pour garantir efficacité et réactivité [2]. Grâce à des logiciels spécialisés, il est possible de modéliser et d'analyser les processus de transport, d'entreposage et de distribution. Ces outils permettent d'optimiser le stockage, de rationaliser les itinéraires et de réduire les coûts de transport [2].

La simulation aide aussi à mieux gérer les stocks. Par exemple, dans un entrepôt, elle peut être Utilisée pour déterminer les emplacements de stockage les plus stratégiques afin de limiter les déplacements des opérateurs et de réduire le temps de préparation des commandes. En testant différents scénarios, il devient possible d'anticiper l'impact d'une hausse de la demande ou de l'introduction de nouveaux produits sur l'ensemble des coûts logistiques [2].

I.6.3 Simulation des flux de fluides

En ingénierie, la simulation des flux de fluides est largement employée pour analyser et optimiser l'écoulement de l'air, de l'eau ou d'autres liquides dans divers systèmes, comme les canalisations, les réseaux de ventilation ou les échangeurs thermiques [11]. Cette approche permet d'améliorer la conception des installations et d'en maximiser les performances.

Elle aide à anticiper d'éventuels problèmes tels que les turbulences, les pertes de charge ou encore les risques de contamination. Grâce à la simulation, il est également possible d'optimiser le dimensionnement des équipements afin de garantir leur bon fonctionnement et d'assurer une efficacité optimale des systèmes [11].

I.6.4 Simulation des flux dans les réseaux informatiques

La simulation des flux ne se limite pas aux systèmes physiques. Dans le domaine des réseaux informatiques, elle permet d'analyser la circulation des données afin d'optimiser l'utilisation des ressources et d'améliorer les performances des infrastructures [11]. Grâce à des outils de simulation, il est possible de tester différentes configurations réseau, d'anticiper l'impact de l'ajout de nouveaux utilisateurs ou équipements et d'identifier d'éventuels points de saturation. Cette approche joue un rôle clé dans la gestion de la bande passante, la prévention des congestions et la priorisation du trafic, notamment dans des environnements complexes où la fluidité des échanges de données est essentielle [11].

I.7 Principaux outils de simulation des flux de production

I.7.1 FlexSim

FlexSim est un logiciel de simulation 3D performant qui permet de modéliser, simuler, prédire et visualiser divers systèmes industriels et logistiques. Il est utilisé dans plusieurs secteurs, notamment la fabrication, la manutention, la santé, l'entreposage, l'exploitation minière et la logistique. Il offre une solution flexible pour l'optimisation des processus et la prise de décision [5].

- Un modèle de simulation sous Flexsim peut être composé de deux principales parties :

- Un modèle 3D du système physique qui peut représenter les machines, les convoyeurs, les systèmes de stockage, les moyens de manutentions, etc. Un flux est modélisé par le déplacement des flow items, ces derniers représentent le mouvement des produits dans le système [6].
- Un ou plusieurs Process Flow décrivent l'enchaînement des comportements logiques du système. Ils sont représentés sous la forme d'un ensemble d'étapes, où chacune Correspond à une tâche et peut nécessiter une ou plusieurs ressources. On peut les considérer comme un organigramme alternatif à la programmation [6].

Figure I.1 : Exemple de modèle 3D du système physique

I.7.2 CIROS

CIROS est la plate-forme extrêmement puissante et éprouvée dans l'industrie pour la création et l'application de modèles de simulation 3D pour la technologie d'automatisation. Enrichi de mécanismes et de matériaux didactiques, CIROS peut être utilisé de diverses façons dans l'environnement d'apprentissage. Qu'il s'agisse de modèles préfabriqués, d'in- terfaces industrielles avec des robots et des contrôleurs ou de recherches avec des approches via Python [7].

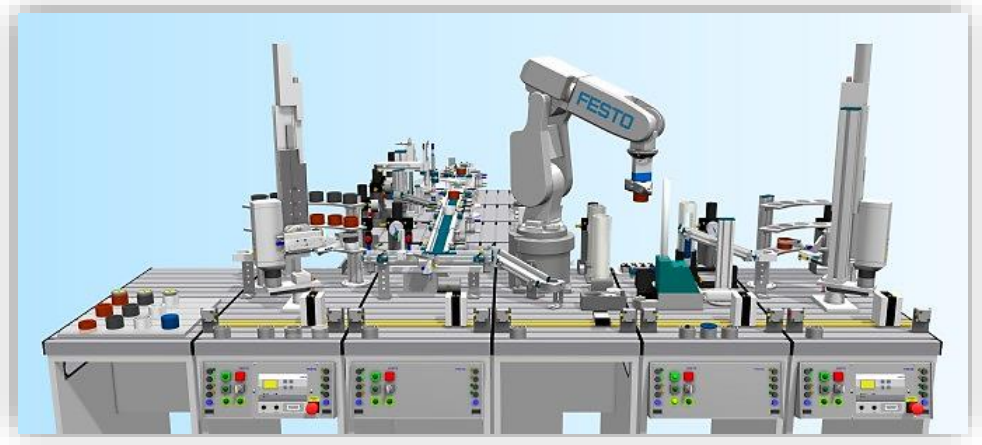


Figure I.2 : CIROS Education

Il existe deux versions de CIROS, CIROS Studio et CIROS Education, tous les deux permettent :

- **La programmation des robots** :

CIROS offre à l'utilisateur une large sélection de robots de différentes marques, telles que MITSUBISHI, KUKA et ABB. Il propose également des cours, des formations et des vidéos pour faciliter l'apprentissage de la manipulation et de la programmation des robots de manière simple et efficace.

- **La programmation des API (Automates programmables industriels)** :

CIROS propose un environnement de travail idéal pour l'apprentissage et la program- mation des automates programmables industriels (API), en particulier les SIEMENS S7. Son interface intuitive et conviviale permet aux utilisateurs d'accéder facilement aux données essentielles, offrant ainsi un retour d'information détaillé sur l'état du système en cours de simulation. De plus, CIROS est compatible avec plusieurs autres plateformes, facilitant l'exécution des programmes en temps réel. Il prend en charge des outils comme OPC, pour une connexion avec STEP7 ou TIA Portal, ainsi que le câble EasyPort, qui permet d'interfacer directement un automate réel avec le système virtuel de CIROS.

La seule différence entre les deux versions est que CIROS Education ne permet ni la création de nouveaux modèles ni la connexion à des systèmes de contrôle de robots [8].

I.7.3 Plant Simulation

Plant Simulation de Tecnomatix est un logiciel conçu pour simuler et optimiser les systèmes et processus de production. Il permet d'améliorer le flux des matières, l'utilisation des ressources et la logistique à tous les niveaux, que ce soit à l'échelle d'une usine entière, d'une ligne de production ou d'une installation locale [14].

Grâce à la création de modèles numériques, Plant Simulation aide à analyser et optimiser les performances des systèmes logistiques, notamment en production. Ces simulations permettent de tester différents scénarios sans impacter la production réelle ou, dans le cadre de la planification, bien avant l'installation du système. Le logiciel propose aussi des outils d'analyse avancés, avec des statistiques et des graphiques, facilitant l'évaluation des scénarios et la prise de décisions dès les premières étapes de planification.

Figure I.3 : Logiciel Plant Simulation

I.7.4 Arena

Arena est un logiciel de simulation avancé reposant sur le langage SIMAN, conçu pour modéliser et analyser des systèmes complexes de manière intuitive. Il adopte une approche graphique orientée objet, où les utilisateurs assemblent des modules sur une interface visuelle pour représenter les différents éléments du système étudié [12].

Cet outil prend en charge l'ensemble du processus de simulation, allant de la collecte et l'analyse des données d'entrée jusqu'à l'interprétation des résultats et l'animation des scénarios simulés. Grâce à son architecture modulaire et hiérarchique, Arena permet la création de modèles personnalisés et l'intégration de modules spécifiques, offrant ainsi une grande flexibilité d'adaptation aux besoins de l'utilisateur [12].

Sa polyvalence en fait une solution largement utilisée dans des domaines variés tels que la production industrielle, l'optimisation des processus métiers, la logistique hospitalière et la gestion des flux de transport. En combinant un langage de simulation performant avec une interface conviviale, Arena démocratise l'accès à la simulation et facilite son adoption par un large éventail d'utilisateurs.

I.7.5 AnyLogic

AnyLogic est un logiciel de simulation polyvalent qui intègre plusieurs approches de modélisation, comme la simulation d'événements discrets, la dynamique des systèmes et la modélisation basée sur des agents. Il dispose d'un éditeur graphique intuitif et permet aussi d'écrire du code en Java pour personnaliser les modèles. Ce logiciel est utilisé dans de nombreux domaines, notamment la diffusion d'informations dans des réseaux complexes, la gestion de la

chaine d'approvisionnement et l'analyse des processus d'entreprise. Il aide à construire des modèles détaillés, à comparer différents scénarios et à soutenir la prise de décision.

AnyLogic a notamment permis de simuler et d'analyser des chaines d'approvisionnement, qu'elles soient collaboratives ou non. Grâce à sa flexibilité et à son approche multi-méthodes, il constitue un outil performant pour modéliser et optimiser des systèmes complexes dans divers secteurs tels que la santé, le transport et la logistique.

I.7.6 Factory I/O

Factory I/O est un simulateur 3D d'usine virtuelle destiné à l'apprentissage des technologies d'automatisation. Facile à prendre en main, il permet de modéliser rapidement une usine en utilisant une sélection de composants industriels standards. Le logiciel propose également de nombreuses scènes prédéfinies, inspirées d'applications industrielles réelles, couvrant différents niveaux de difficulté, du débutant à l'avancé [9].

Il est principalement utilisé comme plateforme de formation aux automates programmables industriels (API/PLC), qui sont les contrôleurs les plus répandus dans le secteur industriel. Toutefois, Factory I/O peut également être exploité avec des microcontrôleurs, des SoftPLC, ou encore via des protocoles tels que Modbus, entre autres [9].

Figure I.4: FACTORY I/O

I.8 Les avantages de la simulation de flux

I.8.1 Optimisation des processus

L'un des principaux atouts de la simulation de flux est sa capacité à identifier des pistes d'amélioration pour optimiser les processus industriels et logistiques. Que ce soit pour une chaîne de production, un entrepôt ou un réseau de distribution, la simulation permet de comparer plusieurs configurations et de retenir celles offrant les meilleures performances [3]. Grâce aux outils de simulation comme FlexSim, il devient possible d'optimiser l'utilisation des ressources, de réduire les temps de cycle et d'améliorer la fluidité des opérations [5].

I.8.2 Réduction des coûts

L'analyse des flux permet de détecter en amont les dysfonctionnements, les gaspillages et les pertes de performance. Cette démarche s'inscrit pleinement dans la logique du Lean Manufacturing, qui vise à éliminer les activités non productives et à garantir un fonctionnement plus efficace. L'optimisation issue de la simulation contribue ainsi à réduire les coûts liés à la production, au stockage, au transport et même à la consommation énergétique. Par exemple, une simulation logistique peut permettre d'optimiser les itinéraires de livraison et donc de diminuer les coûts de carburant [5].

I.8.3 Prise de décision stratégique

En offrant un environnement virtuel sécurisé, la simulation permet de tester différents scénarios sans perturber les opérations réelles. Cette capacité est particulièrement utile pour l'aide à la décision stratégique : choix d'un nouvel équipement, réorganisation d'une ligne de production ou redimensionnement d'un entrepôt [14].

La simulation permet également d'intégrer des données réelles pour améliorer la précision des prévisions, notamment grâce à l'exploitation des données massives (Big Data) dans le contexte de l'Industrie 4.0 [11].

I.8.4 Sécurisation et fiabilité des systèmes

La simulation joue un rôle essentiel dans l'anticipation des risques et l'amélioration de la sécurité des systèmes industriels. Dans le domaine des flux de fluides, par exemple, elle permet d'identifier les risques de surpression, de fuite ou de défaillance, ce qui contribue à prévenir les accidents et à renforcer la fiabilité des installations [13].

Dans le cadre des systèmes automatisés ou des jumeaux numériques, la simulation permet également d'anticiper les défaillances, de tester des procédures d'urgence et d'améliorer la sécurité opérationnelle [13].

I.9 Positionnement et originalité du travail

Le présent travail s'inscrit dans la dynamique de transformation digitale des systèmes industriels, où la simulation et l'automatisation constituent des leviers essentiels pour améliorer la performance et réduire les coûts opérationnels. En s'appuyant sur Factory I/O, un simulateur 3D immersif dédié à la formation et à la validation des systèmes automatisés, ce mémoire propose une approche complète alliant étude, automatisation et simulation d'un système industriel.

L'originalité de ce travail réside dans l'intégration cohérente entre la modélisation fonctionnelle du processus, la programmation de l'automate (API Siemens) et la simulation 3D du système. Cette combinaison permet de tester, analyser et optimiser le comportement du processus dans un environnement virtuel avant toute mise en œuvre réelle, réduisant ainsi les risques opérationnels et les coûts de mise en service.

Cette méthode offre un positionnement innovant, car elle dépasse une simple simulation visuelle pour proposer un véritable prototype numérique utilisable pour :

- Valider la logique automate,
- Détecter les erreurs de fonctionnement,
- Optimiser les temps de cycle et l'utilisation des ressources,
- Améliorer la sûreté et la fiabilité du système.

Le point fort de ce travail est donc d'avoir démontré comment un outil moderne comme Factory I/O peut être intégré dans un cycle complet d'ingénierie d'un système automatisé, illustrant concrètement l'apport de la simulation dans la conception et l'optimisation de systèmes industriels dans le contexte de l'Industrie 4.0.

I.10 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de l'Industrie 4.0 et de son impact sur les systèmes de production modernes. Nous avons mis en évidence l'évolution des technologies industrielles, les enjeux associés à la digitalisation, ainsi que

les piliers technologiques qui transforment profondément les modes de conception, de pilotage et d'optimisation des processus.

La gestion et la simulation des flux ont été identifiées comme des leviers essentiels pour analyser, maîtriser et améliorer la performance des systèmes industriels. La simulation offre en effet un environnement virtuel permettant de tester différents scénarios, d'anticiper les risques, d'optimiser les ressources et de soutenir la prise de décision stratégique. Les différents types de simulation ainsi que leurs domaines d'application ont été présentés, soulignant la diversité et la richesse des approches disponibles.

Enfin, une analyse des principaux outils de simulation utilisés dans l'industrie, tels que FlexSim, CIROS, Plant Simulation, Arena, AnyLogic et Factory I/O, a montré leur importance dans la modélisation, la validation et l'optimisation des systèmes automatisés. Ces outils constituent aujourd'hui des éléments clés pour la mise en œuvre de solutions numériques innovantes, notamment dans la perspective des jumeaux numériques et des systèmes cyber-physiques.

Ainsi, ce chapitre fournit le cadre théorique sur lequel s'appuiera le reste du mémoire, consacré à l'étude, l'automatisation et la simulation d'un système industriel via Factory I/O. Les concepts présentés ici serviront de base pour comprendre les choix méthodologiques, les modèles développés et les résultats obtenus dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Etude et Description du Système de tri automatisé

II.1 Introduction

Les systèmes de tri automatisés constituent aujourd'hui un élément fondamental des systèmes industriels de production et de logistique. Leur développement s'inscrit dans un contexte marqué par l'évolution rapide des technologies d'automatisation et par l'émergence du paradigme de l'Industrie 4.0, qui vise à rendre les systèmes de production plus intelligents, flexibles et performants. Dans ce cadre, le tri automatisé permet d'améliorer significativement la productivité, la qualité des produits et la fiabilité des processus, tout en réduisant les coûts liés à la main-d'œuvre et aux erreurs humaines.

Un système de tri automatisé repose sur l'interaction coordonnée de plusieurs composants matériels et logiciels, notamment les capteurs, les actionneurs, les pré-actionneurs et les automates programmables industriels. Ces éléments permettent d'assurer la détection, l'identification, la classification et l'orientation des produits selon des critères prédéfinis. Selon la littérature scientifique, l'intégration de l'automatisation et des technologies numériques dans les systèmes industriels est considérée comme un levier majeur pour accroître l'efficacité et l'adaptabilité des chaînes de production modernes :
« L'Industrie 4.0 repose sur l'intégration des systèmes cyber-physiques, de l'automatisation et des technologies de l'information afin de créer des systèmes de production intelligents et autonomes » [15]

Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude approfondie et une description détaillée du système de tri automatisé faisant l'objet de ce travail. Il commence par une présentation générale des systèmes de tri automatisés, suivie de la description du système étudié et des critères ayant motivé son choix. Les objectifs attendus du travail seront ensuite précisés afin de clarifier la démarche adoptée.

Par ailleurs, ce chapitre introduit les outils et technologies utilisés pour la mise en œuvre du système, en particulier les systèmes automatisés de production. Une distinction claire sera établie entre la partie opérative, constituée des composants matériels, et la partie commande, assurée par les composants logiques. Enfin, une présentation des automates programmables industriels ainsi que des principaux langages de programmation utilisés, tels que le Ladder et le Grafcet, permettra de poser les bases nécessaires à la modélisation, à l'automatisation et à la simulation du système dans les chapitres suivants.

II.2 Présentation générale des systèmes de tri automatisés

Les systèmes de tri automatisés sont des installations industrielles conçues pour identifier, classifier et orienter automatiquement différents objets ou produits selon des critères prédéfinis tels que la couleur, la taille, la forme, le poids ou le type de matériau. Ces systèmes sont largement utilisés dans les chaînes de production modernes afin d'améliorer la productivité, la précision et la rapidité du processus de tri tout en réduisant l'intervention humaine.

Dans l'industrie, les systèmes de tri automatisés reposent sur l'intégration de plusieurs technologies telles que les capteurs, les automates programmables industriels (API), les actionneurs et les systèmes de transport comme les convoyeurs. L'ensemble de ces composants fonctionne de manière coordonnée pour assurer l'identification et la séparation efficace des produits.[16]

II.2.1 Principe de fonctionnement des systèmes de tri automatisés

Le fonctionnement d'un système de tri automatisé repose sur plusieurs étapes successives permettant d'identifier et de séparer les objets selon leurs caractéristiques.
Les principales étapes sont :

- **Détection de l'objet :** un capteur détecte la présence d'un objet sur le convoyeur.
- **Identification :** les caractéristiques de l'objet sont analysées (couleur, taille, poids, etc.).
- **Traitement de l'information :** l'automate programmable industriel analyse les données reçues.
- **Prise de décision :** le système détermine la destination de l'objet.
- **Action de tri :** un actionneur oriente l'objet vers la zone correspondante.[17]

II.2.2 Composants principaux d'un système de tri automatisé

Un système de tri automatisé est constitué de plusieurs éléments matériels et logiciels travaillant ensemble pour assurer le processus de tri.

❖ **Capteur**

- Les capteurs permettent de détecter la présence et les caractéristiques des objets.

❖ **Convoyeurs**

- Ils assurent le transport continu des produits dans la chaîne de tri.

❖ **Automate programmable industriel**

- L'API contrôle l'ensemble du système et coordonne les opérations de tri.

❖ **Actionneurs**

- Les actionneurs exécutent l'action mécanique nécessaire pour séparer les objets.

❖ **Systèmes de supervision**

- Ils permettent la surveillance et le contrôle du système en temps réel. [16]

II.2.3 Types de systèmes de tri automatisés

Les systèmes de tri automatisés peuvent être classés selon le critère utilisé pour identifier les objets.

❖ **Tri par couleur**

- Utilise des capteurs optiques capables d'identifier les différentes couleurs des objets.

❖ **Tri par taille ou forme**

- Utilise des capteurs optiques ou des systèmes de vision industrielle.

❖ **Tri par poids**

- Utilise des capteurs de pesage ou balances industrielles.

❖ **Tri par identification**

- Utilise des technologies telles que les codes-barres ou la RFID.[18]

II.3 Description détaillée du système de tri étudié

Avant d'expliquer le système de tri automatisé, nous allons vous présenter un aperçu de l'entreprise concernée (EL Kader Plast) et ses informations de base.

L'entreprise EL KADER PLAST est une société algérienne spécialisée dans la transformation des matières plastiques et le recyclage.

Figure II.1: Logo El Kader Plast

II.3.1 Présentation Générale

- **Localisation de l'usine :** Elle est implantée stratégiquement à Oggaz, dans la wilaya de Mascara (Algérie).
- **Historique :** Bien que sa maison mère existe depuis 2013, EL KADER PLAST a lancé sa première ligne de production de palettes 100% algériennes à Oggaz vers 2022.
- **Coordonnées et Contact :**
  - Siège social/Commercial : Souvent répertorié à la Cité El-Riadh, Bir El Djir, Oran (pour la partie administrative et commerciale).
  - Téléphones : +213 (0) 560 91 94 73 / +213 (0) 561 60 58 95.
  - Email : contact@elkaderplast.com
  - Site Web : elkaderplast.com

L'entreprise est reconnue pour son engagement écologique, utilisant des matériaux 100% recyclables et contribuant à l'économie circulaire dans la région de Mascara.

II.3.2 Activités et Produits

L'entreprise se positionne comme un leader dans les solutions logistiques durables et le recyclage de plastique (notamment le Polypropylène - PP et le Polyéthylène Haute Densité - PEHD). Ses principaux produits incluent :

1. **Palettes en plastique :** Robustes, légères et conformes aux normes ISO/EURO, utilisées pour le transport sécurisé.
2. **Caisses et Palox :** Caisses en plastique ajourées pour le stockage et le transport, particulièrement adaptées au secteur agricole.
3. **Intercalaires plastiques :** Plaques alvéolaires utilisées dans la palettisation pour les secteurs agroalimentaire et pharmaceutique.

4. **Masterbatch :** Fabrication de colorants pour l'industrie plastique.

II.3.3 Secteurs d'Application

Ses solutions s'adressent principalement aux industries suivantes :

- Logistique et transport.
- Agroalimentaire.
- Pharmaceutique et cosmétique.
- Chimie et automobile.

II.3.4 Processus du fonctionnement général du l'entreprise

Voici les différentes étapes du processus de fonctionnement de l'entreprise qui permettent de comprendre le flux global des opérations effectuées au niveau de l'entreprise :

1. Triage manuelle

À ce stade, les ouvriers trient manuellement les déchets plastiques par type et les placent dans de grands sacs en vue de l'étape suivante. Parmi les types de plastique triés figurent le polypropylène (PP) et le polyéthylène haute densité (PEHD).

Figure II.2 : Décharge de déchets plastiques

2. Déchiqueteur

À ce stade, le plastique préalablement trié est broyé dans une machine appelée déchiqueteur en petits morceaux de plastique prêts pour l'étape suivante.

Figure II.3 : Déchiqueteur

Figure II.4 : Plastique déchiqueter

3. Lavage

Ici, les morceaux de plastique sont lavés pour éliminer les déchets organiques et les impuretés. Pour ce faire, ils sont trempés et brassés dans trois cuves d'eau équipées de moteurs qui mettent le plastique en mouvement pendant le lavage. Ces cuves sont disposées en ligne.

Figure II.5 : Cuves d'eau

Figure II.6 : Vue intérieure de cuves

4. Séchage et transport

Dans ce procédé, le plastique est transféré des réservoirs au silo à l'aide de souffleur, permettant ainsi le transfert et le séchage simultanés du plastique.

Figure II.7 : Souffleur

Figure II.8 : Elévateur

5. Triage par couleur

Les morceaux de plastique lavés et séchés arrivent au système de tri automatisé par élévateur, où ils sont triés par couleurs (acceptées et rejetées). Chaque couleur suit un parcours distinct : les couleurs acceptées terminent les étapes suivantes, tandis que les couleurs rejetées sont conditionnées dans un grand sac.

Figure II.9 : station de triage par couleur automatise

6. Fusion et reformage

À ce stade, les morceaux de plastique sont fondus et des colorants spéciaux sont ajoutés (si nécessaire). La fusion est réalisée à l'aide d'une résistance qui produit une température élevée. Une fois le plastique transformé en pâte, il est chauffé davantage avec une autre résistance, puis pressé à travers un moule pour obtenir des filaments de plastique fondu.

Figure II.10 : résistance

7. Refroidissement et séchage

À ce stade, les filaments de plastique fondu sont aspirés dans un courant d'eau pour être refroidis et durcis, puis séchés à l'aide d'un compresseur d'air.

Figure II.11 : Refroidissement de filaments de plastique

Figure II.12 : Operation de suchage

8. Granulation

Les brins de plastique solide sont acheminés vers une machine appelée granulateur, qui les granule et les tamise. À ce stade, le plastique granulé est prêt à être utilisé et moulé.

Figure II.13 : Opération de granulation

9. Moulage

Le plastique granulaire est aspiré dans la machine de moulage, précisément jusqu'à la balance qui pèse la masse exacte nécessaire au moulage du produit (dans notre cas, une palette en plastique). Une fois le poids requis atteint, l'aspiration s'arrête et la machine commence à faire fondre le plastique et à le comprimer dans le moule. Après un court instant, le produit prend forme et devient plus solide grâce au durcissement du plastique. Le moule est ensuite ouvert et le produit fini est transféré vers une zone désignée.

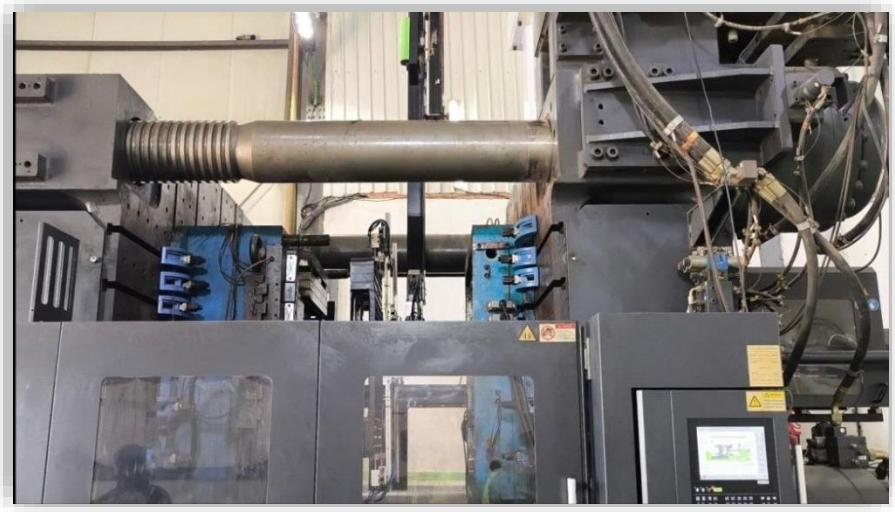


Figure II.14 : Le moule

Figure II.15 : Produit finale

II.3.5 Processus de fonctionnement ‘ Triage’

Le système de triage par couleurs permet de séparer automatiquement des produits selon leur couleur, en utilisant un système de vision industrielle et des actionneurs pneumatiques de type vérins (**figure II.16**)

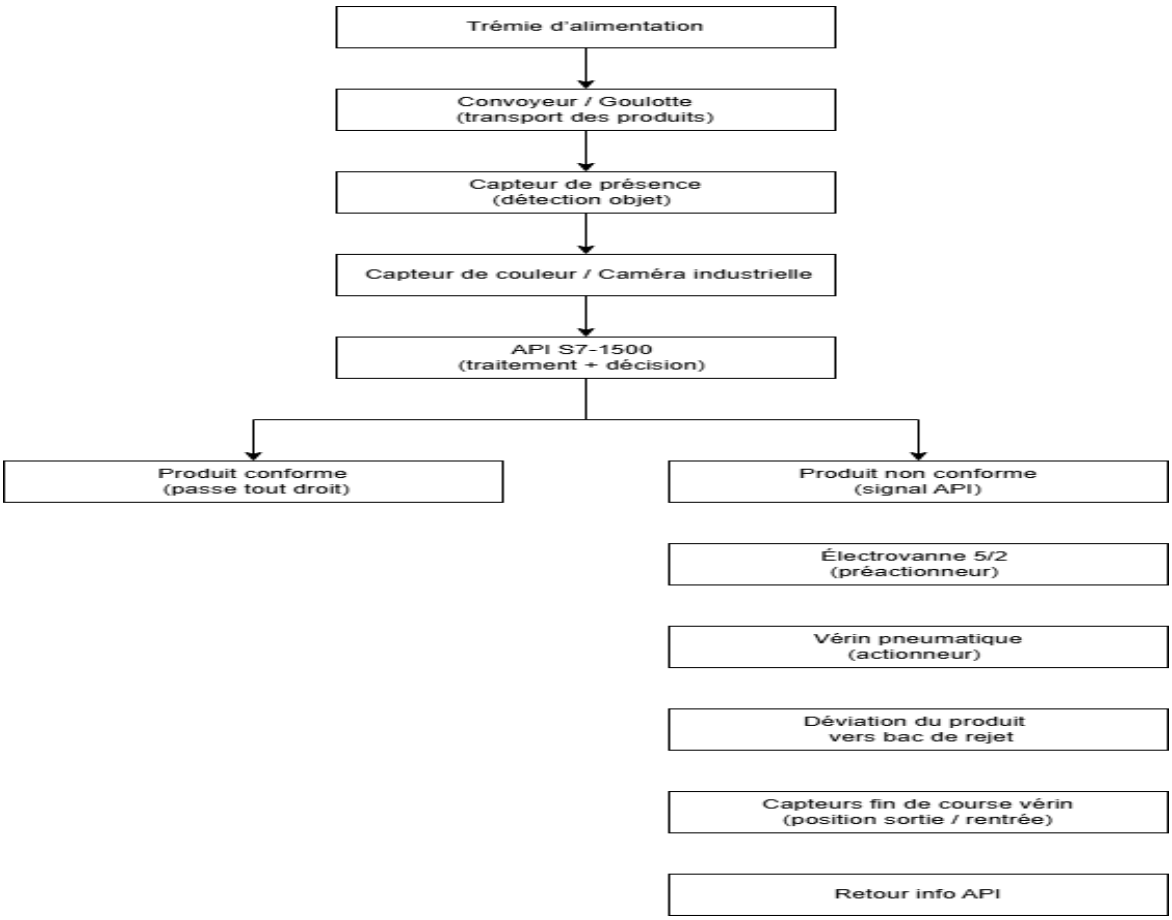


Figure II.16 : Schéma synoptique du système de tri automatisé par couleurs (API + vérin)

Dans un premier temps, les produits sont introduits dans une trémie d'alimentation, puis acheminés à l'aide d'un dispositif de transport (goulottes vibrantes ou convoyeur) assurant leur disposition en file unique.

Ensuite, chaque produit passe devant un système de détection optique composé de capteurs de couleur ou de caméras industrielles. Ces capteurs analysent en temps réel les caractéristiques visuelles des objets.

Les données collectées sont ensuite envoyées vers un automate programmable industriel tel que le Siemens S7-1500, qui traite les informations en fonction des critères de tri prédéfinis.

Lorsque le produit est conforme, il continue son trajet normal vers la sortie principale. En revanche, lorsqu'un produit non conforme est détecté, l'automate envoie une commande vers un système pneumatique.

Ce système actionne un vérin pneumatique qui effectue un mouvement de translation rapide pour dévier physiquement le produit hors de sa trajectoire principale vers une zone de rejet.

Enfin, les produits sont séparés en deux catégories : produits conformes et produits non conformes.

- ## Composants nécessaires de la station de tri

  - **Automate programmable (API) :** Siemens S7-1500
  - **Capteurs (détection) :** Capteurs de couleur (RGB), Caméra industrielle, Capteurs de présence (photoélectriques), Capteurs de position (fin de course pour vérin)
  - **Actionneurs :** Vérins pneumatiques (simple ou double effet)
  - **Pré actionneurs :** Électrovannes pneumatiques (5/2 ou 3/2)
  - **Autres éléments : Compresseur** d'air, Unité de traitement d'air (FRL : filtre, régulateur, lubrificateur), Convoyeur ou goulotte vibrante, Alimentation électrique

II.4 Critère de choix du système (pourquoi on a choisi ce système)

Le choix du système de triage par couleurs repose sur une analyse technique, économique et fonctionnelle approfondie ,La solution retenue doit assurer précision, rapidité, fiabilité et facilité de maintenance tout en respectant les contraintes budgétaires et sécuritaires de l'environnement industriel aussi il offre une solution innovante et efficace pour optimiser les processus de tri dans divers secteurs tels que l'industrie alimentaire , le recyclage et la logistique en permettant une classification rapide et précise des produits en fonction de leur couleur

Dans le cadre de la conception de ce système, plusieurs critères doivent être pris en considération afin d'assurer performance, fiabilité et facilité de maintenance.

Critère de choix	Description
Critères techniques	- Précision et performance du capteur de couleur - choix de l'automate programmable (PLC) - choix des actionneurs - Vitesse et capacité de production
Critères économiques	- Coût d'investissement initial - Coût d'exploitation
Critères de fiabilité et de maintenabilité	- Fiabilité du système - Maintenabilité
Critères de sécurité	- Le système doit respecter les normes de sécurité industrielle
Critères d'évolutivité	- Un système industriel moderne doit être évolutif - Cette flexibilité garantit la durabilité du système.

Tableau II.1 : Critère de choix

II.5 L'objective attendus du travail

Ce projet porte sur la **conception et l'étude d'un système de production automatisé** dédié au tri d'objets par reconnaissance colorimétrique. L'objectif central est d'optimiser la productivité industrielle en améliorant la rapidité et la précision des flux.

Le travail s'articule autour de trois piliers technologiques majeurs :

- **Contrôle-Commande :** Programmation d'un Automate Programmable Industriel (API) via l'environnement **TIA Portal** pour la gestion des capteurs et actionneurs.

- **Simulation et Jumeau Numérique :** Utilisation de **Factory I/O** pour modéliser et valider le comportement du système dans un univers industriel virtuel 3D.
- **Supervision et Connectivité :** Mise en œuvre de **Node-RED** pour assurer le monitoring en temps réel, l'interfaçage des données et la communication entre les composants.

En intégrant ces outils modernes, ce projet démontre une maîtrise complète du cycle de vie d'un système automatisé, de sa conception logique à sa supervision opérationnelle. [13]

II.6 Présentation des outils et technologies utilisés

Dans le cadre de la réalisation du **système de triage par couleurs**, conçu comme un véritable **système de production automatisé**, plusieurs outils matériels et logiciels ont été mobilisés. Ces derniers assurent l'ensemble du cycle de vie du projet : de la conception à la programmation, en passant par la simulation, la supervision et la maintenance. L'intégration de technologies innovantes, telles que la **simulation 3D** et le **jumeau numérique**, permet d'optimiser la qualité de la conception et de renforcer la fiabilité de la validation du système.

II.6.1 Les systèmes automatisés de production (SAP)

1. Définition

Les systèmes automatisés de production (SAP) représentent un ensemble structuré de ressources matérielles et logicielles intégrées permettant d'assurer l'exécution automatique d'un processus industriel. Ils reposent sur l'utilisation coordonnée de capteurs, actionneurs, automates programmables industriels, réseaux de communication et systèmes de supervision afin de garantir la transformation de matières premières en produits finis avec une intervention humaine minimale.[17]

Un SAP se caractérise par :

- La capacité de perception du procédé via capteurs
- La prise de décision automatique par unité de commande
- L'exécution des actions par actionneurs
- La surveillance en temps réel
- L'optimisation continue du processus.[19]

2. Architecture d'un système automatisé de production

- Un SAP est classiquement structuré en plusieurs sous-systèmes interdépendants.

2.1. Partie opérative (PO)

La Partie Opérative (PO**)** assure l'exécution matérielle des actions pilotées par la commande. Véritable cœur physique du système de production, elle regroupe l'ensemble des composants réalisant les transformations du produit [21]. Elle se compose de :

2.1.1. Composants matériels

- Les composants les plus importants de la partie opérative comprennent

a. Les capteurs

Les capteurs sont des dispositifs permettant de détecter une grandeur physique (position, température, pression, couleur, vitesse…) et de la convertir en signal exploitable par la partie commande. [21]

- **Rôle des capteurs**
  - Acquisition d'informations du procédé
  - Surveillance des états du système
  - Détection d'événements
  - Rétroaction pour la régulation [17]
- **Types de capteurs**
  - **Capteurs tout ou rien** (Détecteurs inductifs, Détecteurs capacitifs, Détecteurs optiques, Fins de course)
  - **Capteurs analogiques** (Capteurs de température, Capteurs de pression, Capteurs de débit, Capteurs de position) [22]
  - **Capteur numérique** (Codeur …)

b. Actionneurs

Les actionneurs sont des dispositifs capables de transformer une énergie (électrique, pneumatique ou hydraulique) en mouvement ou en action mécanique. [17]

- **Rôle des actionneurs**
  - Mise en mouvement des éléments mécaniques
  - Génération de force ou couple
  - Réalisation d'opérations industrielles [21]

- **Types d'actionneurs :**
  - **Actionneurs électriques (**Moteurs CC, Moteurs asynchrones, Servomoteurs, Moteurs pas à pas)
  - **Actionneurs pneumatiques (**Vérins pneumatiques, Moteurs pneumatiques)
  - **Actionneurs hydrauliques (**Vérins hydrauliques, Moteurs hydrauliques) [20]

c. Pré-actionneurs

Les pré-actionneurs sont des dispositifs intermédiaires entre la partie commande et les actionneurs. Ils adaptent la puissance et la nature du signal afin de permettre la commande correcte des actionneurs. [21]

- **Rôle des pré-actionneurs**
  - Amplification de puissance
  - Adaptation de tension ou courant
  - Commutation de charge
  - Protection des équipements [17]
- **Exemples de pré-actionneurs :** Relais électromécaniques, Contacteurs, Variateurs de vitesse, Distributeurs pneumatiques, Amplificateurs de puissance

d. Effecteurs

Les effecteurs représentent les éléments terminaux du système automatisé qui agissent directement sur la pièce ou le produit afin de réaliser l'opération industrielle. [23]

- **Rôle des effecteurs**
  - Manipulation d'objets
  - Transformation du produit
  - Assemblage ou tri
  - Transport et positionnement [17]
- **Exemples d'effecteurs :** Pinces robotiques, Ventouses, Outils de coupe, Têtes de tri, Systèmes de soudage, Buses de pulvérisation

2.2. Partie commande (PC)

La partie commande constitue le cerveau du système automatisé. Elle repose sur :

- Automates programmables industriels (API)
- Microcontrôleurs industriels
- La logique des relais câblées
- Régulateur Industriel

II.6.2 Automate programmable industriel (API)

1. Définition

Un API (Automate Programmable Industriel) est un ordinateur industriel spécialisé conçu pour surveiller, contrôler et automatiser des équipements ou des processus de production. Il se compose généralement d'une unité centrale (CPU), de modules d'entrées/sorties (I/O), d'un bus de communication, et parfois d'un écran HMI intégré ou associé. Programmable via des langages normalisés par la norme CEI 61131-3 (comme le Ladder, le texte structuré ou le SFC), l'API est conçue pour des applications en temps réel avec une forte fiabilité. [24]

Ses fonctions comprennent :

- Lecture de capteurs (analogiques ou numériques),
- Traitement logique ou arithmétique des données,
- Commande d'actionneurs (moteurs, vannes, relais, etc.),
- Communication avec d'autres équipements via des protocoles industriels comme Modbus, Profibus, Ethernet/IP, CANopen, etc.

Les API se déclinent en différentes tailles et puissances, depuis les micro-automates embarqués sur machines simples, jusqu'aux automates modulaires ou redondants utilisés dans les environnements critiques (automobile, agroalimentaire, énergie, chimie, etc.

2. Le rôle d'un API (Automate Programmable Industriel) :

- **Commander un système industriel :** Il contrôle les machines et procédés automatiques (moteurs, vérins, convoyeurs, systèmes de tri…).
- **Traiter les informations :** Il reçoit les signaux des capteurs (détecteurs, capteurs de couleur, température, pression…) et les traite selon un programme.
- **Envoyer des ordres :** Il commande les actionneurs (moteurs, électrovannes, relais, contacteurs…).
- **Assurer l'automatisation :** Il remplace les systèmes à relais classiques et permet un contrôle flexible, programmable et fiable.

3. Les types d'API

- **API Compact (Monobloc) :** tous les éléments sont intégrés dans un seul boîtier : Alimentation, CPU (Unité centrale), Entrées/Sorties (E/S), Utilisé pour : des Petites installations, Machines simples, Systèmes de tri de petite taille

➢ **Avantages** : Moins coûteux, Facile à installer, Compact

➢ **Inconvénient** : Extension limitée

Figure II.17 : API Compact

- **API Modulaire :** Composé de modules séparés : Module alimentation, Module CPU, Modules d'entrées/sorties, Modules de communication. Utilisé pour :

- Systèmes industriels complexes
- Grandes lignes de production

➢ **Avantages** : Extensible, Flexible, Maintenance facile

➢ **Inconvénient** : Plus coûteux

Figure II.18 : API Modulaire

- **API Compact Haute Performance**
  - Petite taille mais capacités avancées.
  - Communication Ethernet, bus industriels, HMI intégrée.

Figure II.19 : Siemens S7-1200

❖ Marques Principales d'API dans l'industrie

Les marques des API	Caractéristique
Siemens	- Très répandue dans le monde, surtout en Europe et Asie. - Série SIMATIC très utilisée pour les grandes lignes de production, énergie, chimie… - Réputée robuste, compatible avec de nombreux protocoles industriels.
Rockwell Automation (marque Allen-Bradley)	- Très populaire en Amérique du Nord. - Contrôleurs comme ControlLogix et CompactLogix utilisés dans la production automobile, alimentaire, etc.
Schneider Electric	- Offre les API Modicon, adaptés aux systèmes industriels variés. - Bon équilibre entre performance et coût pour de nombreuses applications.
Mitsubishi Electric	- Reconnue pour ses PLC MELSEC, souvent utilisés en Asie et dans l'électronique. - Performants pour les applications complexes et rapides.
Omron	- Très utilisée dans l'automatisation industrielle, notamment pour l'intégration avec robots et capteurs. - Bonne facilité de programmation et intégration HMI.
ABB	- API robuste pour les applications industrielles lourdes.

	- Souvent utilisés dans énergie, pétrole, gaz et usines automatisées.
Bosch Rexroth	- API adaptée aux systèmes industriels exigeants (usines automatisées, machines industrielles).
KEYENCE	- Bien connue pour ses API et systèmes de contrôle précis, souvent dans l'automatisation de précision.
Panasonic	- API plus petite ou pour des applications moyennes, appréciés pour leur coût et performances.
Delta Electronics	- <API utilisée dans des installations compactes ou économes en énergie.

Tableau II.2 : Les marques des API

II.6.3 Langages de programmation

1. **Le langage STL :** Le langage STL (Statement List), ou AWL en allemand (Anweisungsliste), est le langage de plus bas niveau disponible dans TIA Portal. Contrairement au Ladder (graphique), il s'agit d'une liste d'instructions textuelles que l'automate exécute l'une après l'autre. Voici les détails sur son fonctionnement et ses particularités :

1.1. Le Principe de fonctionnement

Le STL repose sur l'utilisation d'un accumulateur (un registre interne à l'automate) et d'un RLO (Result of Logic Operation / Résultat Logique Partiel).

- **Séquentiel** : Le processeur lit chaque ligne de haut en bas.
- **Logique de pile** : Pour faire une opération, on "charge" une valeur dans l'accumulateur, puis on effectue une opération avec la valeur suivante.

1.2. Syntaxe type :

- U E 0.0 (Und / Et) : Vérifie si l'entrée 0.0 est à 1.
- = A 4.0 (Assignation) : Affecte le résultat à la sortie 4.0.
- L MW 10 (Load) : Charge le mot mémoire 10 dans l'accumulateur.
- T MW 20 (Transfer) : Transfère le contenu de l'accumulateur vers le mot mémoire 20.

1.3. Les Avantages du STL

Bien qu'il soit moins utilisé aujourd'hui au profit du SCL, le STL conserve des avantages spécifiques :

- **Vitesse d'exécution** : Sur les anciennes générations (S7-300/400), c'était le langage le plus rapide car il est très proche du langage machine.

- **Compacité** : Un programme en STL occupe souvent moins de place en mémoire qu'un programme graphique (LAD/FBD) pour la même fonction.
- **Flexibilité totale** : Il permet de réaliser des opérations "exotiques" que les langages graphiques interdisent parfois (sauts complexes, manipulation directe des registres, pointeurs Any).

1.4. Les Inconvénients

Il est important de savoir que le STL perd de son intérêt sur les automates modernes (S7-1200 et S7-1500) :

- **Maintenance difficile** : Un code STL est complexe à lire pour quelqu'un qui n'a pas conçu le programme.
- **Absence d'optimisation** : Sur S7-1500, l'architecture est optimisée pour les blocs "Symboliques". Le STL, qui force souvent l'accès direct à la mémoire, peut paradoxalement ralentir l'automate.

Notez que le langage STL n'est pas supporté par la gamme S7-1200.

2. Le Langage LADDER (LD) : Logique à contacts :

C’est le langage le plus utilisé en industrie car il ressemble aux schémas électriques traditionnels.

2.1. Principe : Représentation graphique avec des rails d'alimentation, des contacts (entrées) et des bobines (sorties).

2.2. Structure : Il se lit de gauche à droite et de haut en bas. On parle de "Rungs" (échelons).

2.3. Composants clés :

- **Contacts (NO/NF) :** Représentent les entrées (Capteurs de Factory IO, boutons poussoirs).
- **Bobines (Coils) :** Représentent les sorties (Moteurs des convoyeurs, voyants)

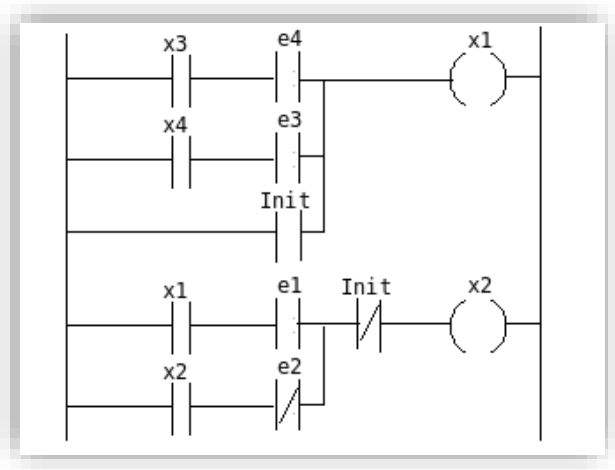


Figure II.20 : Le langage LADDER

2.4. **Avantage :** Très facile à diagnostiquer et à dépanner pour un technicien de maintenance.

3. Le Langage SCL (Structured Control Language) : C'est un langage de haut niveau, très proche du **Pascal** ou du **C**.

3.1. **Principe :** Programmation textuelle structurée (si... alors... sinon / IF... THEN... ELSE).

3.2. **Avantage :** Plus compact que le Ladder pour les algorithmes complexes et le traitement de données.

```
REGION Scenario1
    #Structure.Control := 7;
    #Structure.Select := 8;
    IF FALSE THEN
        IF FALSE THEN
            "Block_2"();
        END_IF;
    ELSE
        #Static_1 := #Structure.Control;
        #Static_2 := #Structure.Select;
        //***Static_2 should get 8(value of Structure.Select)
        //but it takes 7(Value of Structure.Control).***
    END_IF;
END_REGION
```

Figure II.21 : Le langage SCL

4. Le Langage GRAPH (S7-GRAPH) : Le Grafcet est conçu spécifiquement pour les processus séquentiels.

4.1. Principe : Division du programme en Étapes (actions) et Transitions (conditions). C'est le cœur de ton système de tri.

4.2. Avantage : Permet de visualiser instantanément où le cycle de tri est bloqué en cas de panne.

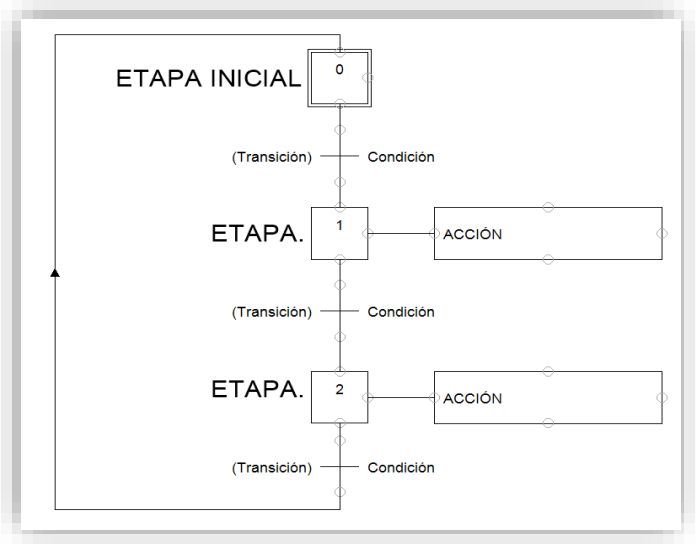


Figure II.22 : Le langage grafcet

II.6.4 Comparaison entre les langages de programmation

Le choix d'un langage de programmation sous TIA Portal dépend de la complexité de la tâche à accomplir ; le tableau comparatif ci-dessous met en évidence les forces de chaque langage pour la commande, le séquençage et le traitement de données.

Langage	Type	Utilisation idéale	Point fort
LADDER	Graphique	Sécurités, Logique de base	Intuitif, standard électrique
SCL	Textuel	Calculs, Boucles, Tableaux	Puissance algorithmique
Grafcet	Séquentiel	Cycles de tri, Étapes	Clarté du déroulement

Tableau II.3 : Les langages de programmation

II.6.5 Choix de l'API

Le choix d'un automate programmable industriel constitue une étape essentielle dans la conception d'un système automatisé de production, car il influence directement les performances, la fiabilité et l'évolutivité du système. Dans ce projet, l'automate retenu est **Siemens S7-1500**, reconnu pour ses capacités avancées de traitement, de communication et de diagnostic adaptées aux environnements industriels modernes. [20]

Figure II.23: simens S7-1500

II.6.5.1 Présentation générale de l'API Siemens S7-1500

L'automate Siemens S7-1500 appartient à la gamme SIMATIC et constitue une solution de contrôle hautes performances destinée aux applications d'automatisation complexes. Il intègre un processeur puissant, une mémoire importante et des fonctions de communication étendues permettant la gestion de systèmes distribués. [20]

II.6.5.2 Avantages de l'API Siemens S7-1500

L'utilisation du S7-1500 présente plusieurs avantages :

- Performances élevées
- Communication avancée
- Diagnostic intégré

- Haute fiabilité
- Modularité
- Sécurité industrielle
- Intégration avec logiciels d'ingénierie [17]

II.6.5.3 Adaptation de l'API au système de triage par couleurs

Le choix du S7-1500 est particulièrement adapté au système de triage par couleurs grâce à :

- Gestion rapide des signaux capteurs optiques
- Synchronisation de convoyeur et actionneurs
- Communication avec IHM
- Possibilité d'extension future
- Diagnostic rapide des défauts [20].

II.7 Logiciels de programmation (logiciel choisi : TIA Portal)

- **Définition :** Un logiciel de programmation industrielle est un outil conçu spécifiquement pour développer, rédiger, tester et installer des programmes de commande destinés aux systèmes d'automatisation industrielle, notamment les automates programmables industriels (API ou PLC, pour Programmable Logic Controllers). Il propose une interface de développement qui facilite l'utilisation de langages standardisés, comme ceux définis par la norme IEC 61131-3, afin d'élaborer la logique de commande des machines et des processus industriels.

- **TIA PORTAL :** est l'environnement logiciel intégré de Siemens pour la gestion et la programmation des systèmes d'automatisation SIMATIC tout au long du cycle de vie d'un projet industriel (fabrication ou process). TIA signifie « Totalement Intégré » et représente la vision de Siemens d'une intégration complète de bout en bout de toutes les tâches de conception, d'exploitation et de maintenance au sein d'une suite logicielle unique et flexible. L'objectif est d'optimiser l'efficacité et de réduire le coût total par rapport à l'utilisation d'outils distincts et fragmentés.

  - **SIMATIC STEP7**

SIMATIC STEP 7, intégré à TIA Portal, est le logiciel de configuration, programmation, vérification et diagnostic de tous les automates SIMATIC. Doté d'un grand nombre de fonctions conviviales, SIMATIC STEP 7 garantit une efficacité nettement supérieure pour toutes les tâches d'automatisation, qu'il s'agisse de la programmation, de la

simulation, de la mise en service ou de la maintenance

- **SIMATIC WinCC**

WINCC (Windows control center) flexible constitue une interface homme /machine (IHM) dédié pour des applications à proximité de la machine et du processus dans la construction d'installation, des machines et des machines de série. De part sa conception généraliste, WINCC flexible est un logiciel d'ingénierie pour tous les pupitres opérateur SIMATIC HMI, de plus petit micro panel jusqu'au multi panel ainsi que d'un logiciel de supervision runtime pour des solutions monoposte basées sur PC et tournant sous Windows de version récentes.

TIA Portal consolide les étapes clés suivantes d'un projet d'automatisation au sein d'un flux de travail d'ingénierie unifié :

- Étapes d'un projet d'automatisation
- Configuration matérielle et gestion du réseau
- Programmation des automates programmables
- Conception de l'interface homme-machine (IHM)
- Simulation et tests du système
- Réseaux de communication et intégration informatique
- Mécanismes de sûreté et de sécurité Mise en service
- Exploitation et diagnostic

- **L'environnement de programmation PLC :** Proposé par TIA Portal facilite considérablement le développement de la logique de commande pour les automates programmables SIMATIC S7 et WinCC. Compatible avec tous les langages définis par la norme IEC 61131-3, il prend en charge le Ladder (LAD), les diagrammes fonctionnels (FBD), le texte structuré (ST), les diagrammes de fonctions séquentielles (SFC) ainsi que les listes d'instructions (IL). Les blocs de code peuvent être organisés hiérarchiquement grâce à des unités d'organisation imbriquées, et les différents langages peuvent être combinés en toute flexibilité au sein d'un même projet via une gestion segmentée.

- **Vues de Tia portales :** Une fois logiciel Tia Portal ouvert, nous aurons deux vues :
  1- **La vue portail :** La vue du portail dans TIA Portal (Siemens) est une interface orientée tâches conçue pour une prise en main rapide et une configuration efficace. Elle permet de gérer les étapes initiales d'un projet, telles que la création, la

configuration matérielle, la programmation et la visualisation, avant de basculer vers la vue du projet détaillée.

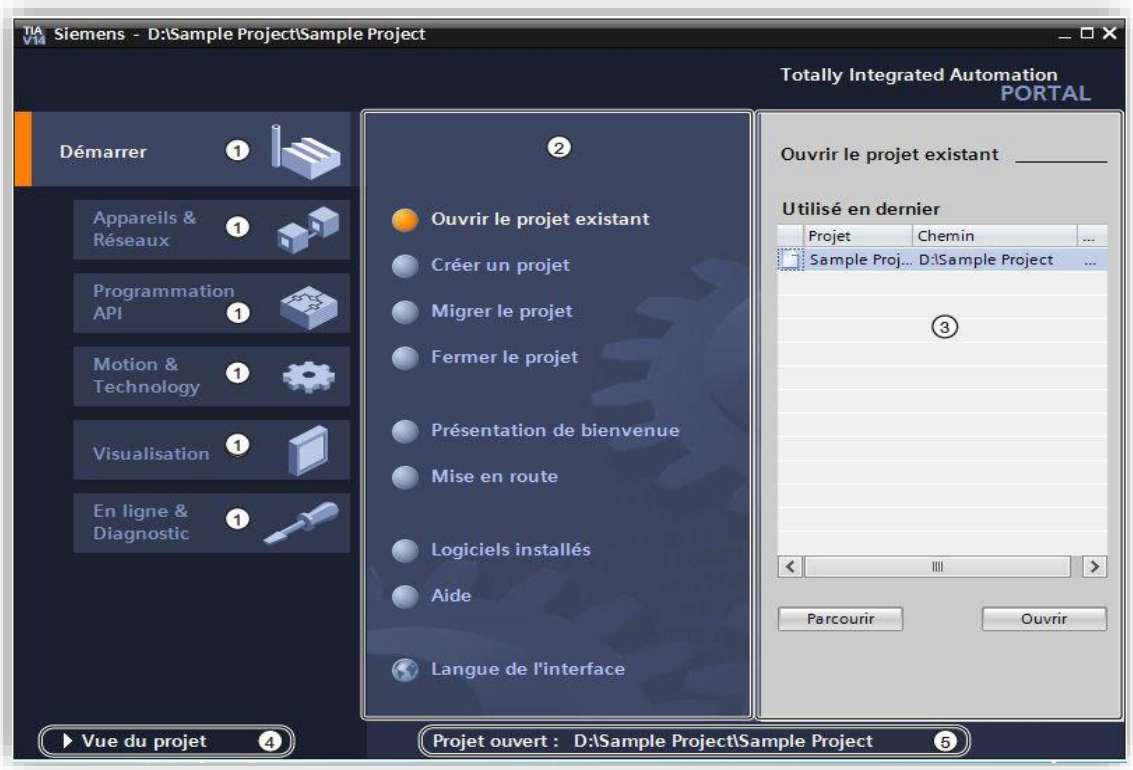


Figure II.24: Vue de portail

2- **Vue de projet :** Dans l'environnement de développement de Siemens, la vue du projet (Project View) est l'interface principale utilisée pour la configuration détaillée et la programmation des systèmes d'automatisation

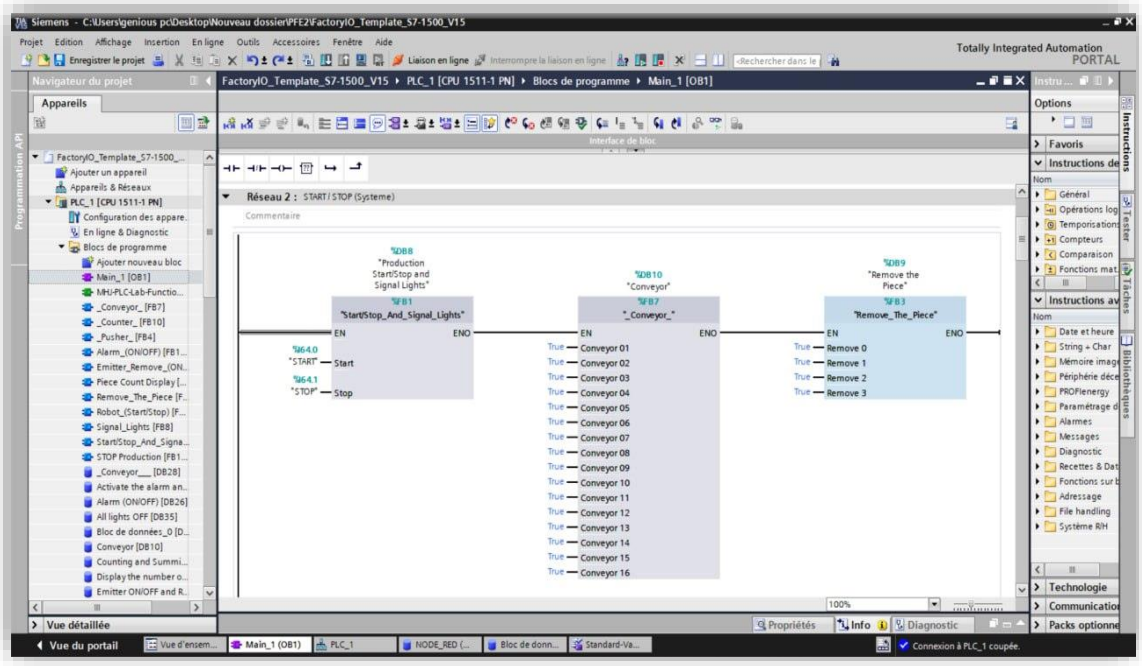


Figure II.25: Vue de projet

- **La fenêtre de travail :** permet de visualiser les objets sélectionnés dans le projet pour être traités. Il peut s'agir des composants matériels, des blocs de programme, des tables des variables, des HMI, …
- **La fenêtre d'inspection :** permet de visualiser des informations complémentaires sur un objet sélectionné ou sur les actions on cour d'exécution (propriété du matériel sélectionner, messager d'erreurs lors de la compilation de blocs de programme,)
- **Les onglets de sélection de tâches :** ont un contenu qui varie en fonction de l'objet sélectionné (configuration matérielle bibliothèques des composants, blocs de programme, instructions de programmation). • Cet environnement de travail contient énormément de données.il est possible de masquer ou réduire certaines de ces fenêtres lorsque l'on ne les utilise pas. • Il est également possible redimensionner, réorganiser, désancrer les différentes fenêtres**.** [21]

a. Les étapes d'application de TIA portal :

La simulation d'un projet dans TIA PORTAL nécessite à quatre étapes principales :

a.1. Création d'un projet : Pour créer un projet dans la vue de portail, il faut sélectionner l'action « créer un projet ». On peut donner un nom au projet, choisir un chemin ou il sera enregistré, indiquer un commentaire ou encore définir l'auteur du projet, une fois que ces informations sont entrées, il suffit de cliquer sur le bouton « crée ».

a.2. Configuration paramétrage matérielle :

Une fois votre projet crée, on peut configurer la station de travail. La première étape consiste à définir le matériel existant. Pour cela, on peut passer par la « vue du projet » et cliquer sur « ajouter un appareil » dans le navigateur du projet. La liste des éléments que l'on peut ajouter apparait (API, HMI, système PC). On commencera par faire le choix de notre CPU pour ensuite venir ajouter les modules complémentaires (alimentation, E/S TOR ou analogiques module de communication…Etc.).

Les modules complémentaires de l'API peuvent être ajoutés en utilisant le catalogue. Si l'on veut ajouter un écran ou un autre API, il faut repasser par la commande « ajouter un appareil » dans le navigateur du projet.

a.3. Établissement de la liaison

Il faut maintenant charger la configuration de l'automate dans celui-ci. Pour cela, il faut tout d'abord connecter l'automate au PC en utilisant l'interface Sima tic S7 PC USB adapté. Ensuite, après avoir sélectionné la vue « En ligne et diagnostique », sélectionnez les

options suivantes :

- Mode : MPI
- Interface PG/PC : Pc Adapter

Il ne reste plus qu'à cliquer sur le bouton « liaison en ligne » pour vous connecter à l'automate.

a.4. Adressage des entrées/sorti

Pour connaitre l'adressage des entrées et sorties présentes dans la configuration matérielle, il faut aller dans « appareil et réseau » dans le navigateur du projet. Dans la fenêtre de travail, on doit s'assurer d'être dans l'onglet « Vue des appareils » et de sélectionner l'appareil voulu.

a.5. Adresse Ethernet de la CPU

Toujours dans les propriétés de la CPU, il est possible de définir son adresse Ethernet. Un double clic sur le connecteur Ethernet de la station fait apparaitre la fenêtre d'inspection permettant de définir ses propriétés. Pour établir une liaison entre la CPU et la console de programmation, il faut affecter aux deux appareils des adresses appartenant au même réseau. On utilisera comme adresse pourl'automate192.168.2. De l'automate.

a.6. Compilation et chargement de configuration matérielle

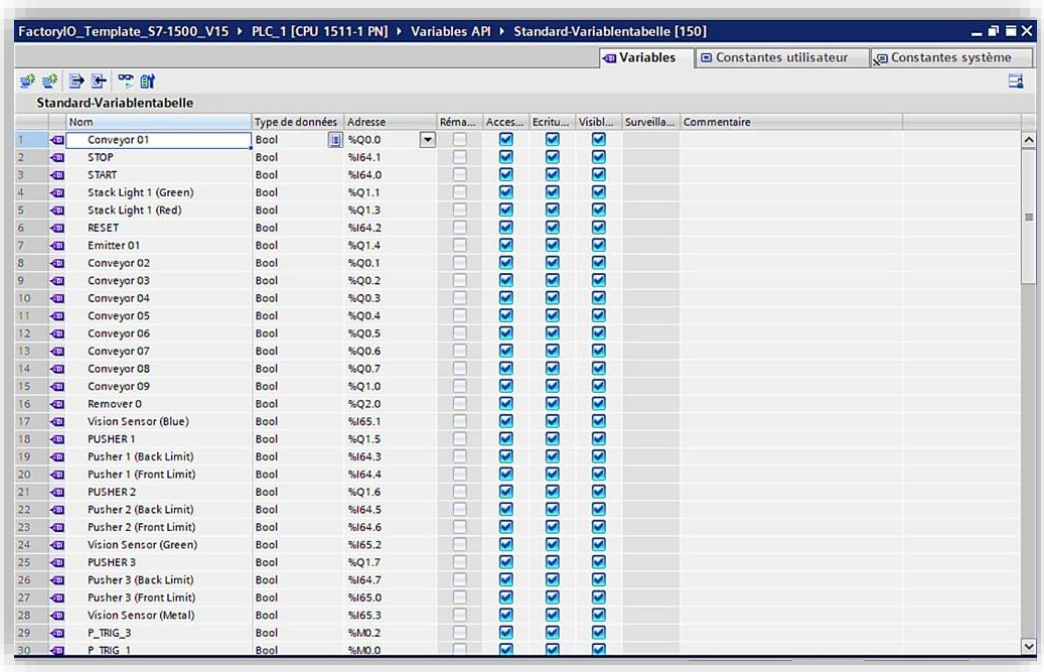
Une foi la configuration matérielle réalisée, il faut la compiler et la charge dans l'automate. La compilation se fait à l'aide de l'cône « compiler » de la barre de tache. On sélectionne l'API dans le projet puis cliquer sur l'icône « compiler ». Une utilisant cette manière, on effectue une compilation matérielle logicielle.
Une Autre solution pour compiler est de faire un clic droit sur l'API dans la fenêtre du projet et de choisir l'option « compiler…. Configuration matérielle »

a.7. Programmation des API :

La programmation est l'utilisation d'un ensemble logique d'éléments et de constructions de langage de programmation nécessaires au traitement afin des signaux destinés à commander une machine ou un processus.

- **Table de variables :**

Dans le but de faciliter la programmation, il est nécessaire de créer une table de variables afin de présenter les différentes entrées/sorties (instrumentation) nécessaire pour le fonctionnement de notre système (Figure 2.8.3.3).



	Nom	Type de données	Adresse	Réma...	Acces...	Ecritu...	Visibl...	Surveilla...	Commentaire
1	Conveyor 01	Bool	%Q0.0		☑	☑	☑		
2	STOP	Bool	%I64.1		☑	☑	☑		
3	START	Bool	%I64.0		☑	☑	☑		
4	Stack Light 1 (Green)	Bool	%Q1.1		☑	☑	☑		
5	Stack Light 1 (Red)	Bool	%Q1.3		☑	☑	☑		
6	RESET	Bool	%I64.2		☑	☑	☑		
7	Emitter 01	Bool	%Q1.4		☑	☑	☑		
8	Conveyor 02	Bool	%Q0.1		☑	☑	☑		
9	Conveyor 03	Bool	%Q0.2		☑	☑	☑		
10	Conveyor 04	Bool	%Q0.3		☑	☑	☑		
11	Conveyor 05	Bool	%Q0.4		☑	☑	☑		
12	Conveyor 06	Bool	%Q0.5		☑	☑	☑		
13	Conveyor 07	Bool	%Q0.6		☑	☑	☑		
14	Conveyor 08	Bool	%Q0.7		☑	☑	☑		
15	Conveyor 09	Bool	%Q1.0		☑	☑	☑		
16	Remover 0	Bool	%Q2.0		☑	☑	☑		
17	Vision Sensor (Blue)	Bool	%I65.1		☑	☑	☑		
18	PUSHER 1	Bool	%Q1.5		☑	☑	☑		
19	Pusher 1 (Back Limit)	Bool	%I64.3		☑	☑	☑		
20	Pusher 1 (Front Limit)	Bool	%I64.4		☑	☑	☑		
21	PUSHER 2	Bool	%Q1.6		☑	☑	☑		
22	Pusher 2 (Back Limit)	Bool	%I64.5		☑	☑	☑		
23	Pusher 2 (Front Limit)	Bool	%I64.6		☑	☑	☑		
24	Vision Sensor (Green)	Bool	%I65.2		☑	☑	☑		
25	PUSHER 3	Bool	%Q1.7		☑	☑	☑		
26	Pusher 3 (Back Limit)	Bool	%I64.7		☑	☑	☑		
27	Pusher 3 (Front Limit)	Bool	%I65.0		☑	☑	☑		
28	Vision Sensor (Metal)	Bool	%I65.3		☑	☑	☑		
29	P_TRIG_3	Bool	%M0.2		☑	☑	☑		
30	P_TRIG_1	Bool	%M0.0		☑	☑	☑		

Figure II.26: Table de variables

- **Blocs de programmation :**

L'automate met à disposition différents types de blocs qui contiennent le programme et les données correspondantes. Selon les exigences et la complexité du processus, il est possible de structurer le programme en différents blocs : OB, FB, FC et DB (Figure 2.8.3.4).

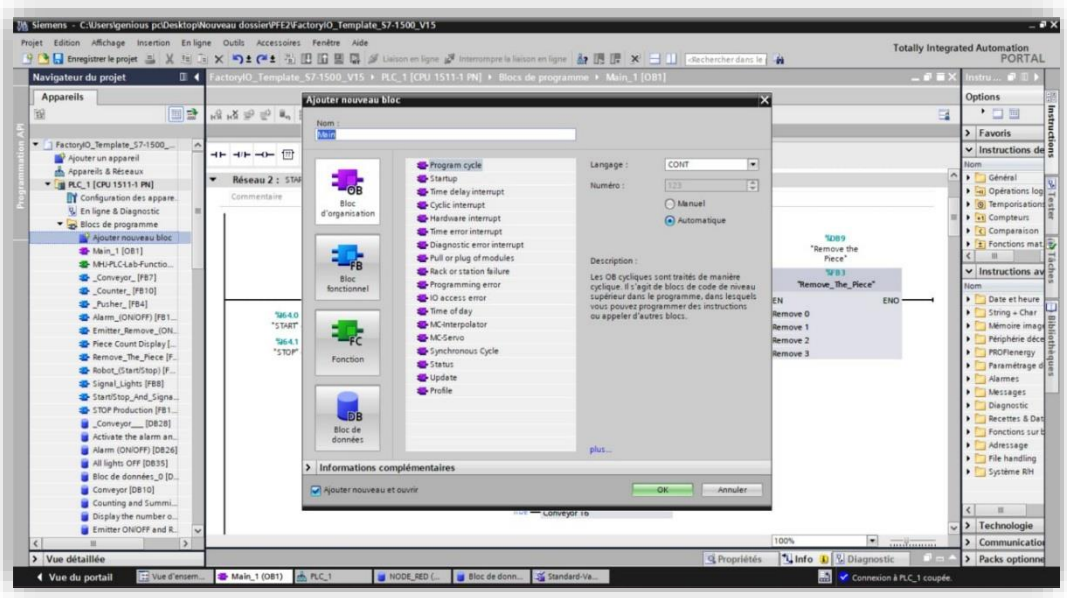


Figure II.27 : Blocs de programmation

- **Bloc d'Organisation (OB) :**

Ils constituent l'interface entre le système d'exploitation et le programme utilisateur. Les OB sont programmables par l'utilisateur, ce qui permet de déterminer le comportement de la CPU.

Les OB sont appelés par le système d'exploitation en liaison avec les événements :

- Comportement au démarrage.
- Exécution cyclique du programme.
- Exécution du programme déclenchée par des alarmes (cyclique, processus, diagnostic).
- Traitement des erreurs.

Pour que le traitement du programme démarre, le projet doit posséder au moins un OB cyclique.

- **Les fonctions (FC) :**

Ce sont des blocs de code sans mémoire. Les données des variables temporaires sont perdues après l'exécution de la fonction. Si on veut mémoriser ces données, il faut utiliser des opérandes globaux. Elles sont utilisées pour la programmation de fonctions utilisées plusieurs fois. On simplifie de ce fait la programmation.

- **Les blocs fonctionnels (FB) :**

Ce sont des blocs de code qui mémorisent durablement leurs paramètres d'entrée, de sortie et d'entrée/sortie dans des blocs de données d'instance afin qu'il soit possible d'y accéder même après le traitement de blocs.

- **Bloc de données (DB) :**

Les DB sont employés afin de tenir à disposition de l'espace mémoire pour les variables de données. Il y a deux catégories de blocs de données. Les DB globaux où tous les OB, FB et FC peuvent lire des données enregistrées et écrire eux -mêmes des données dans le DB. Les instances DB sont attribuées à un FB défini.

II.8 Logiciels de simulation de flux (logiciel choisi Factory I/O)

1. Définition et concept de Factory I/O

Factory I/O est un logiciel de simulation d'usines en 3D conçu pour l'apprentissage de l'automatisme industriel. Contrairement aux simulateurs classiques, il propose un environnement "bac à sable" (sandbox) où l'utilisateur peut construire une chaîne de production complète en utilisant des composants industriels standards (convoyeurs, capteurs, bras pneumatiques, etc.). [9]

Figure II.28: Factory I/O logo

2. Le concept du Jumeau Numérique (Digital Twin)

Il est important de préciser que Factory I/O n'est pas qu'un simple jeu ; c'est un Jumeau Numérique. Il permet de tester un programme automate (sur TIA Portal) dans un monde virtuel avant de l'injecter dans une machine réelle. Cela réduit les risques de casse matérielle et les coûts de développement. [25]

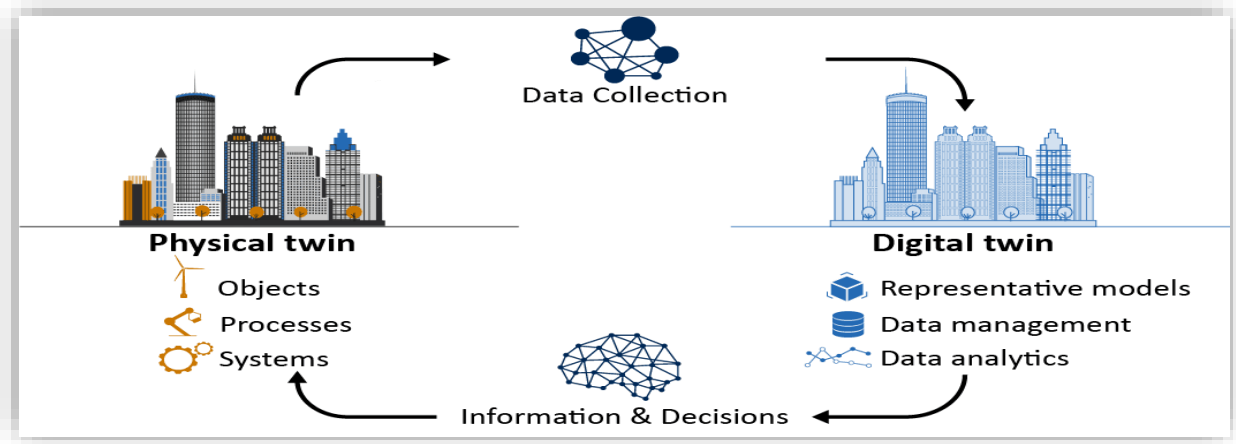


Figure II.29: digital twin concept

3. Fonctionnement et Interfaçage

L'utilisation de Factory I/O repose sur trois piliers :

- La Scène (Le Flux) : On dispose les objets (convoyeurs, émetteurs de colis, récepteurs) pour créer le flux physique.

Figure II.30: le flux de Factory I/O

- Les Drivers () : Le logiciel inclut des pilotes intégrés pour Communiquer avec des automates réels (S7-1200/1500) ou simulés (PLCSIM).

Figure II.31: S7-PLCSIM V13-19

- Le Mapping des Entrées/Sorties : On lie les capteurs virtuels (ex : capteur de présence) aux adresses mémoires de TIA Portal (ex : %I0.0). [26]

4. Avantages du logiciel pour le projet de tri

Voici pourquoi Factory I/O est le choix idéal pour system de tri :

- Réalisme visuel et physique : Simulation des frottements, de la gravité et du poids des colis sur les tapis.
- Diagnostic rapide : Possibilité de forcer des pannes (ex : bloquer un capteur) pour tester la réaction du programme.

- Flexibilité : Permet de simuler des systèmes de tri complexes (tri par couleur, par poids ou par code-barres) sans coût matériel.
- Interopérabilité : Compatibilité totale avec l'écosystème Siemens (TIA Portal / WinCC). [27]

5. Synthèse des fonctionnalités

Voici les différentes fonctionnalités utilisées dans Factory I/O

Caractéristique	Description
Bibliothèque d'objets	Plus de 80 composants industriels (moteurs, vérins, capteurs)
Protocoles supportés	OPC UA, Modbus TCP/IP, Siemens S7-PLCSIM.
Mode de vue	Caméra libre, orbite et vue "First Person" pour immersion totale
Gestion des pannes	Simulation de court-circuit ou de capteur défectueux.

Tableau II.4 : Les fonctionnalités utilisées ‘ Factory I/O ‘

II.9 Logiciels de supervision et d’interfaçage

Les logiciels de supervision et d’interfaçage jouent un rôle essentiel dans les systèmes automatisés de production. Ils permettent la visualisation, la surveillance et le contrôle des processus industriels en temps réel. Parmi ces outils, Node-RED est une plateforme de développement basée sur la programmation par flux qui facilite l’intégration entre différents équipements industriels, systèmes informatiques et applications IoT. [28]

1. Présentation générale de Node-RED

Node-RED est un environnement de développement open source créé initialement par IBM permettant de connecter facilement des dispositifs matériels, des API et des services en ligne à l’aide d’une interface graphique basée sur des flux de données.

Il fonctionne sur la plateforme Node.js, ce qui lui permet d’exécuter des applications JavaScript côté serveur et de gérer efficacement les communications entre différents systèmes. [28]

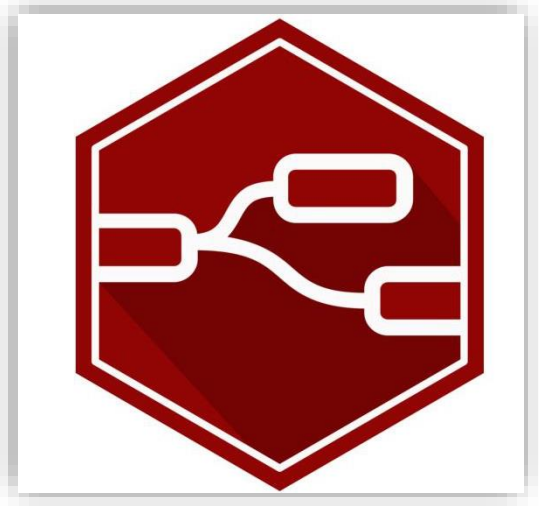


Figure II.32: NODE-RED logo

2. Architecture de Node-RED

L'architecture de Node-RED repose sur un modèle de programmation basé sur des flux (Flow-based programming). Les applications sont construites en connectant différents nœuds représentant des fonctions spécifiques. Les principaux éléments de l'architecture sont :

- **Les nœuds (Nodes)**

Les nœuds représentent les blocs fonctionnels utilisés pour traiter les données.

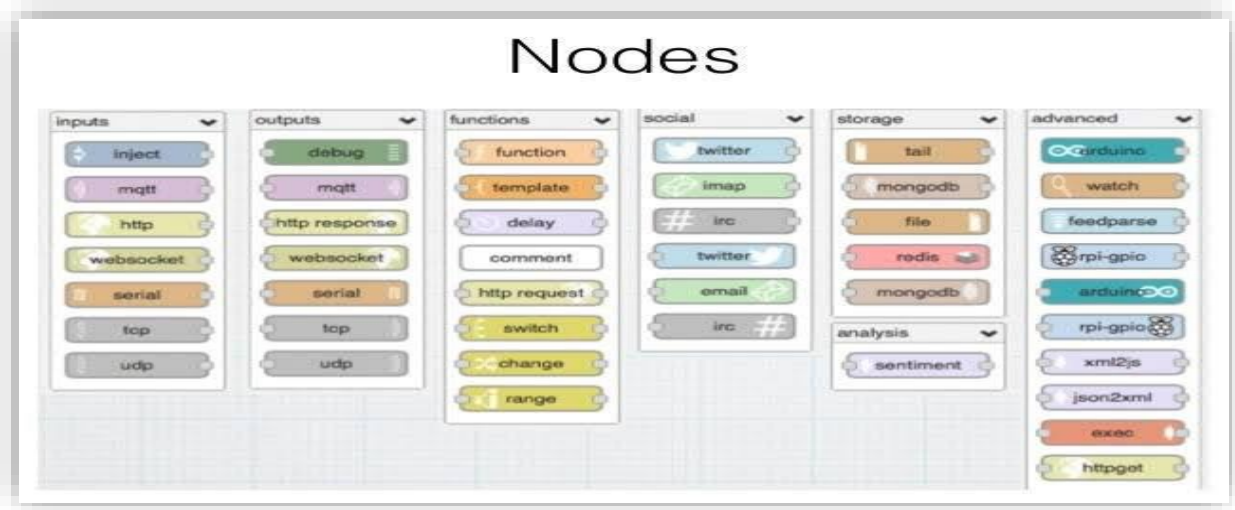


Figure II.33 : Les nœuds de NODE-RED

❖ **Les flux (Flows)**

Un flux correspond à l'ensemble des nœuds connectés entre eux pour réaliser une fonction spécifique.

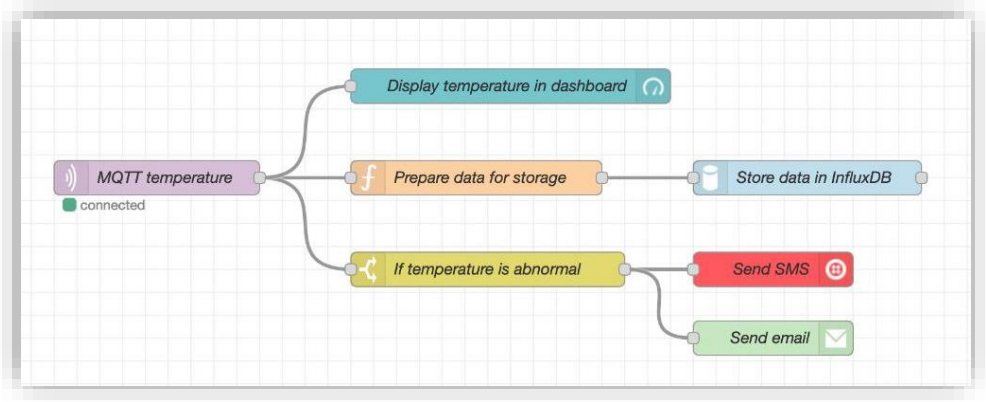


Figure II.34 : Exemple d'un flux NODE-RED

❖ **Les tableaux de bord (Dashboard)**

Ils permettent la création d'interfaces graphiques pour la supervision et la visualisation des données. [29]

Figure II.35 : Exemple d'une table de bord NODE-RED

3. Fonctionnalités de Node-RED dans l'automatisation industrielle

Node-RED offre plusieurs fonctionnalités qui le rendent adapté aux applications industrielles :

- Intégration de capteurs et dispositifs IoT
- Communication avec les automates programmables industriels
- Visualisation des données en temps réel
- Création de tableaux de bord interactifs

- Automatisation de flux de données
- Traitement et analyse des données industrielles [28]

4. Communication entre Node-RED et les systèmes industriels

Node-RED peut communiquer avec différents protocoles industriels tels que :

- MQTT
- HTTP / REST API
- Modbus
- OPC UA
- WebSocket

Cette capacité permet d'intégrer Node-RED dans les architectures industrielles modernes et les systèmes IoT. [30]

5. Avantages de l'utilisation de Node-RED

L'utilisation de Node-RED dans les systèmes de supervision présente plusieurs avantages :

- Interface graphique intuitive
- Développement rapide d'applications
- Intégration facile avec les systèmes industriels
- Compatibilité avec les technologies IoT
- Flexibilité et évolutivité [28]

II.10 Objectif à atteindre

L'objectif de ce chapitre est d'étudier et de décrire en détail le système de tri automatisé retenu, en présentant ses composants matériels et logiciels ainsi que son architecture de fonctionnement.

Il s'agit également de justifier le choix de l'automate programmable industriel et des outils utilisés, notamment TIA Portal pour la programmation, Factory I/O pour la simulation du processus industriel et Node-RED pour la supervision et l'échange de données.

Ce travail vise à concevoir un système cohérent, fonctionnel et communicant permettant la gestion automatique du tri selon des critères prédéfinis.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude détaillée du système de tri automatisé, en décrivant son fonctionnement général, ses composants matériels (capteurs, actionneurs, pré-actionneurs) ainsi que sa partie commande basée sur un API.

Le choix de l'automate et des outils logiciels a été justifié en fonction des exigences techniques et pédagogiques du projet.

L'intégration de TIA Portal pour la programmation, Factory I/O pour la simulation et Node-RED pour la supervision permet d'obtenir une architecture complète et conforme aux principes des systèmes automatisés de production.

Cette étude constitue la base nécessaire pour la phase d'implémentation et de validation présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Automatisation et simulation sous Factory I/O et Node-Red

III.1 Introduction

La croissance rapide des technologies industrielles et l'automatisation des processus industriels ont profondément transformé les systèmes de production modernes. L'utilisation des API (automates programmables industriels) permet actuellement la maîtrise des procédés complexes avec des niveaux de fiabilité élevés tout en améliorant la productivité et la qualité des produits. Dans ce contexte, les systèmes de tri automatisés jouent un rôle important dans la chaîne de production des entreprises, notamment dans la séparation des produits en fonction des critères tels que la couleur ou la matière.

En parallèle avec l'automatisation des processus industriels, la simulation industrielle constitue un outil important dans la conception et la validation des systèmes automatisés. Il s'agit de reproduire virtuellement le fonctionnement d'une installation réelle dans le but d'évaluer les stratégies de commande et anticiper les éventuels désordres préalablement à la mise en service. Les logiciels tels que Factory I/O et les environnements de programmation tels que TIA Portal offrent des plateformes puissantes pour la modélisation et la simulation des systèmes industriels.

Enfin, la supervision et la visualisation des procédés industriels constituent des aspects cruciaux dans la gestion des processus industriels. Les outils actuels tels que Node-RED Dashboard offrent la possibilité de développer des interfaces simples et intuitives pour la commande et la visualisation des procédés industriels, offrant à l'opérateur une vue générale des états des systèmes, des quantités produites et des états des différentes machines en temps réel. Il s'agit là d'interfaces puissantes pour améliorer l'interaction homme-machine et la compréhension du comportement des systèmes automatisés.

Le présent travail s'inscrit dans ce cadre théorique et pratique dans la mesure où il propose l'étude, l'automatisation et la simulation d'une station de tri industrielle basée sur la séparation des pièces en fonction des critères telle que la couleur ou la matière des matériaux, tout en intégrant la possibilité de pilotage et de visualisation des procédés industriels via Node-RED dans un environnement simulé réaliste.

III.2 Objective de travail

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et de mettre en œuvre une station de tri automatisée capable de classifier des pièces industrielles en fonction de leur couleur (bleu, vert) et de leur nature (métallique).

Ce projet vise également à développer une solution complète intégrant la commande, la simulation et la visualisation du système, afin de valider son fonctionnement dans un environnement proche du réel [1].

- Plus précisément, ce travail a pour objectifs de :

1. Concevoir l'architecture fonctionnelle d'un système de tri automatisé.
2. Programmer un automate programmable Siemens en langage Ladder sous TIA Portal.
3. Assurer la communication entre l'automate et un environnement de simulation industrielle.
4. Mettre en place une interface de commande et de visualisation pour le suivi des lots de production.
5. Analyser le comportement dynamique et les performances du système automatisé.

Ce travail s'inscrit dans une démarche pédagogique visant à rapprocher l'étudiant des conditions réelles rencontrées dans l'industrie automatisée.

III.3 Méthodologie de travail

Ce chapitre présente les étapes suivies pour la réalisation et la validation du système automatisé de la station de tri. Dans un premier temps, nous avons identifié les paramètres et composants du système, notamment les capteurs, les actionneurs et les convoyeurs. Ensuite, nous avons configuré la table des variables sous TIA Portal afin d'établir l'adressage entre les différents éléments. Après cette phase, nous avons modélisé et programmé la logique de commande en utilisant le langage Ladder (LAD). Par la suite, nous avons simulé le comportement dynamique de la station via le logiciel Factory I/O, permettant une validation virtuelle du procédé. Enfin, nous avons développé une interface de supervision sous Node-RED pour assurer le contrôle du système, la visualisation de l'état des équipements et le suivi de la production en temps réel.

III.4 Description fonctionnelle détaillée du système de tri

a. Le cahier de charge :

- Start : Le système se met en marche, activant le convoyeur principal, le robot, les poussoirs et l'émetteur.
- Stop : Dès l'appui sur le bouton, l'ensemble du système s'arrête immédiatement, y compris le convoyeur, l'émetteur, le robot et les actionneurs.
- Reset : Les compteurs sont remis à zéro et les alarmes sont réinitialisées.
- Arrêt d'urgence : Tous les équipements (convoyeurs, robot, émetteur, poussoirs) s'arrêtent immédiatement, assurant une sécurité totale du système.
- Au démarrage, l'émetteur libère une première pièce, puis une autre à chaque détection par le capteur pour assurer une alimentation continue.
- Quand la pièce arrive dans la zone du robot, celui-ci démarre automatiquement pour effectuer l'opération prévue.
- Après avoir identifié le type de pièce (bleue, verte, métal), le trieur correspondant s'active pour diriger la pièce vers sa ligne appropriée selon sa couleur et sa matière. Il revient ensuite à sa position initiale.
- Les pièces sont comptées par type. La formation d'une boîte nécessite deux pièces (2 pièces → 1 BOÎTE), ce qui augmente le compteur de production.

III.5 Organigramme générale de fonctionnement

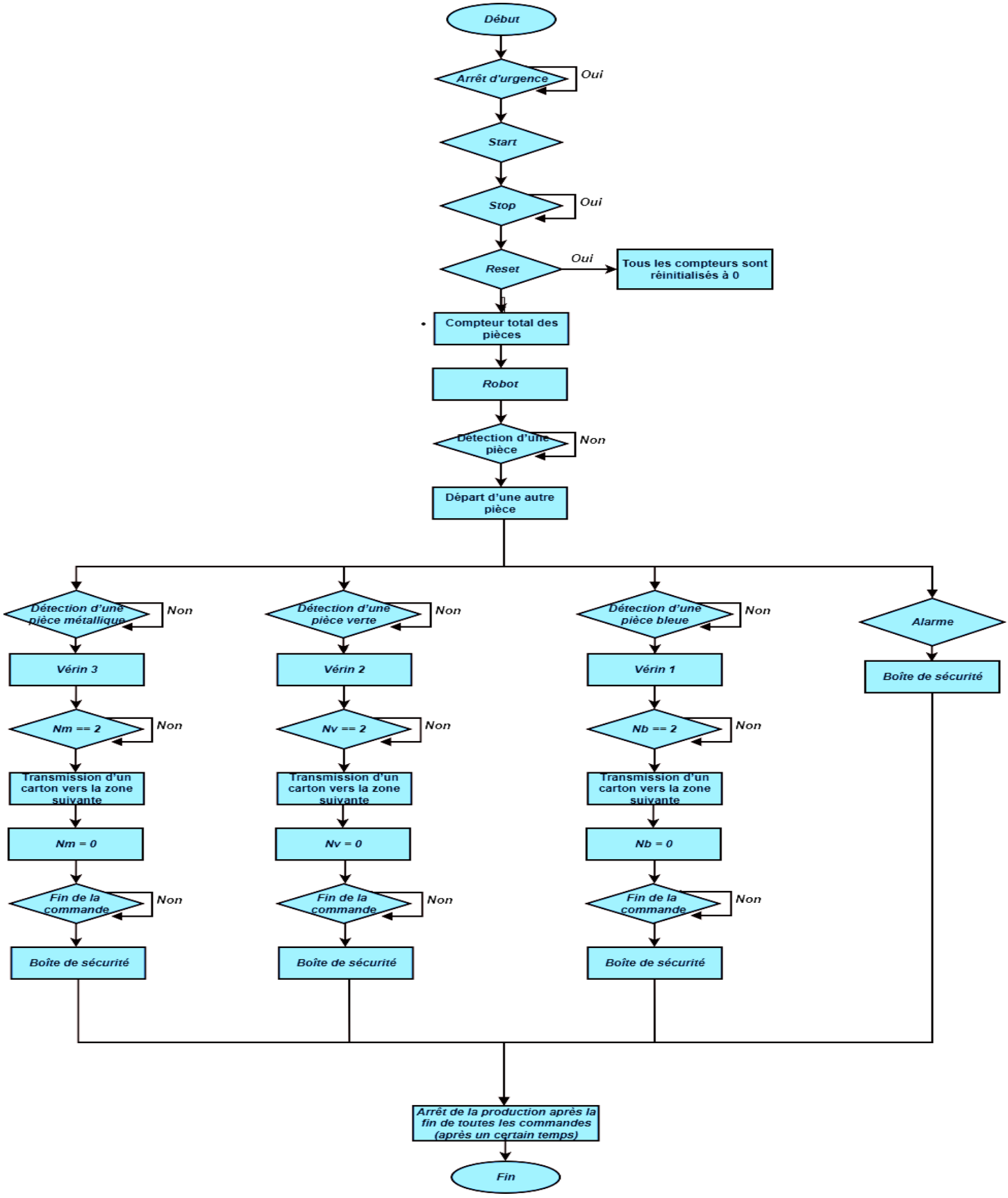


Figure III.1 : Organigramme général du système de la station de tri

III.6 Programmation du Station par TIA portal

III.6.1 Choix de l'API

On commence par sélectionner un automate programmable industriel (API) parmi la liste des automates disponibles dans l'environnement de développement. Pour la réalisation de ce projet, nous avons choisi le SIMATIC S7-1500 CPU 1511-1 PN, version 1.8.

Ce choix a été motivé par les performances élevées de cette CPU, sa rapidité de traitement ainsi que sa compatibilité avec l'environnement de programmation TIA Portal. L'interface PROFINET intégrée permet une communication industrielle fiable avec les équipements et les outils de simulation utilisés dans le projet.

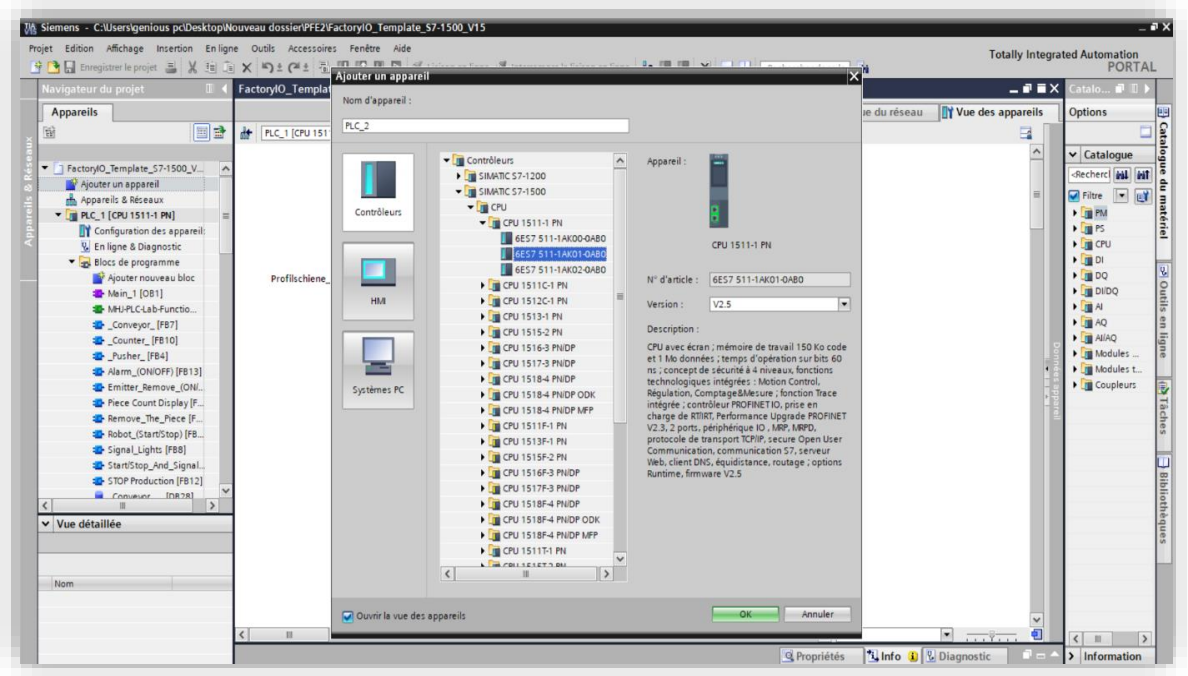


Figure III.2 : Choix le CPU

III.6.2 Identification et configuration des modules d'entrées/sorties

Suite à la délibération précédemment mentionnée du choix de l'automate programmable industriel SIMATIC S7-1500 CPU 1511-1 PN, a été mise en œuvre la configuration matérielle dans le logiciel TIA Portal, c'est-à-dire l'insertion et l'agencement des différents modules indispensables au fonctionnement du système automatisé.

En effet, comme l'illustre la figure ci-après, l'API est configurée avec les modules d'entrées numériques (DI) et de sorties numériques (DQ) fixés sur le rail de montage (ProfilSchiene), tandis que les modules d'entrées permettent de connecter les capteurs du système (détecteur de pièces, fins de course, boutons de commande) aux modules d'entrées alors que les modules de sorties servent à commander les actionneurs (serrages, convoyeurs, etc.) du système de tri.

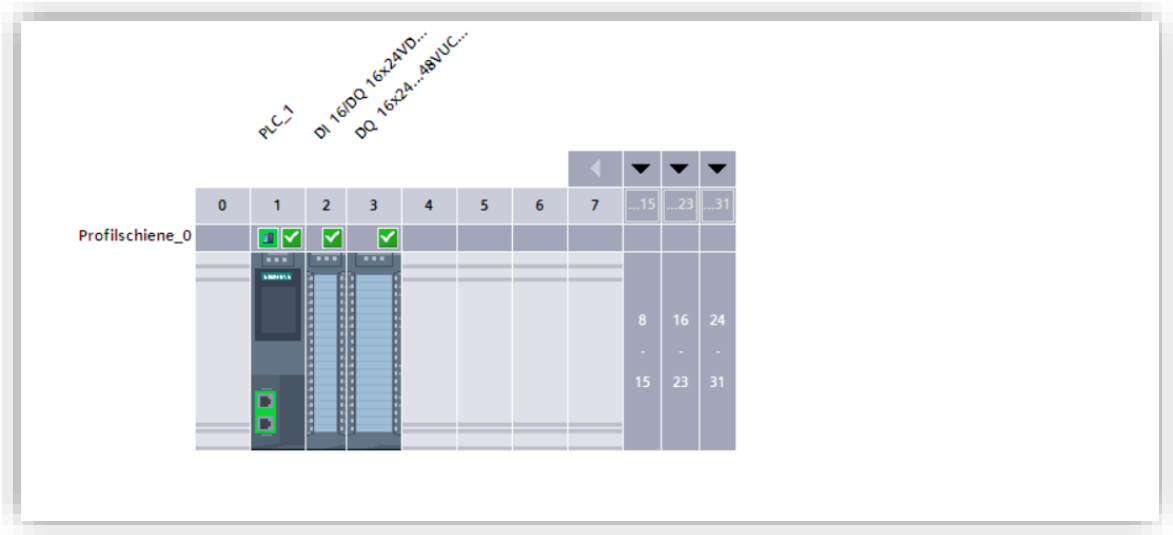


Figure III.3 : Illustre l'appareil

III.6.3 Présentation des blocs programmés

On peut voir sur la figure tous les blocs qui composent le projet sous TIA Portal. La structure du programme est modulaire avec un bloc principal et des blocs fonctionnels (FB) ayant chacun une tâche à réaliser dans le système de tri automatisé.

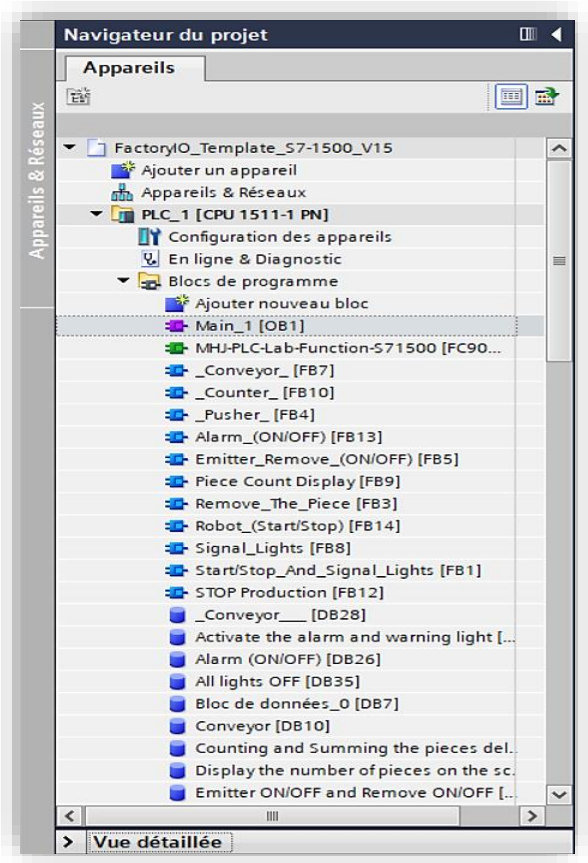


Figure III.4 : Structure du projet PLC – Station de tri

III.6.4 Table des variables (Entrées / sorties)

Ce bloc contient les entrées et les sorties liées au programme, ainsi que les mémoires physiques nécessaires au fonctionnement du système.

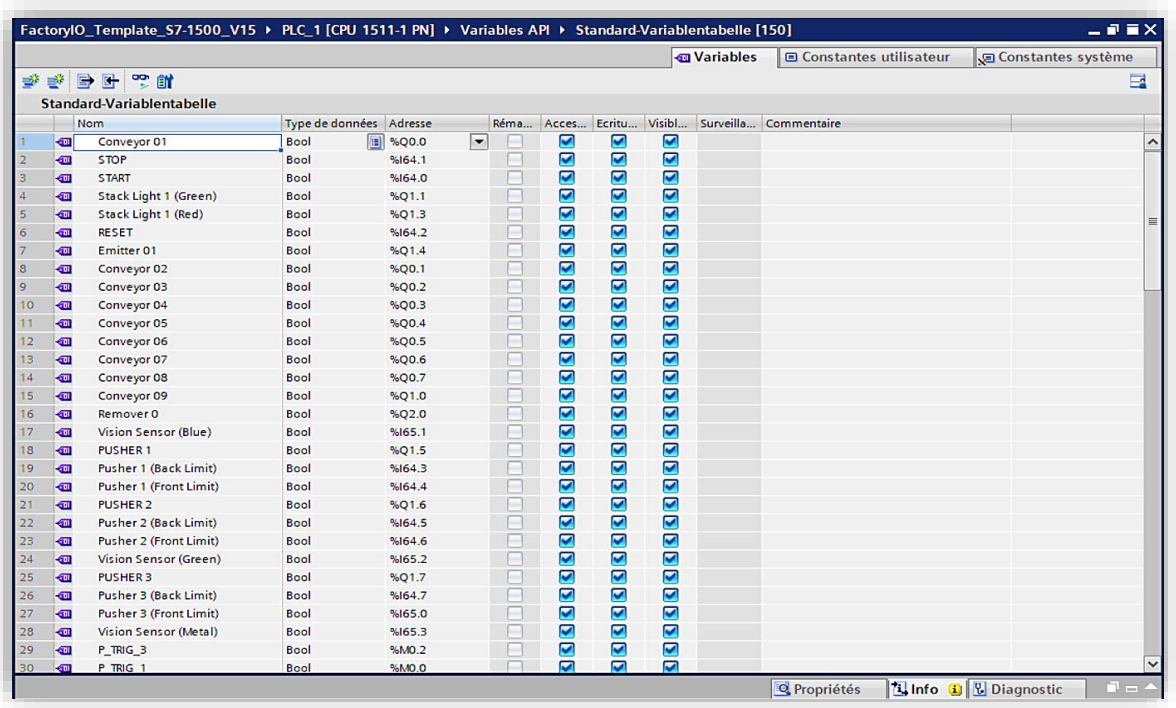


Figure III.5 : Table des variables API – Partie 1

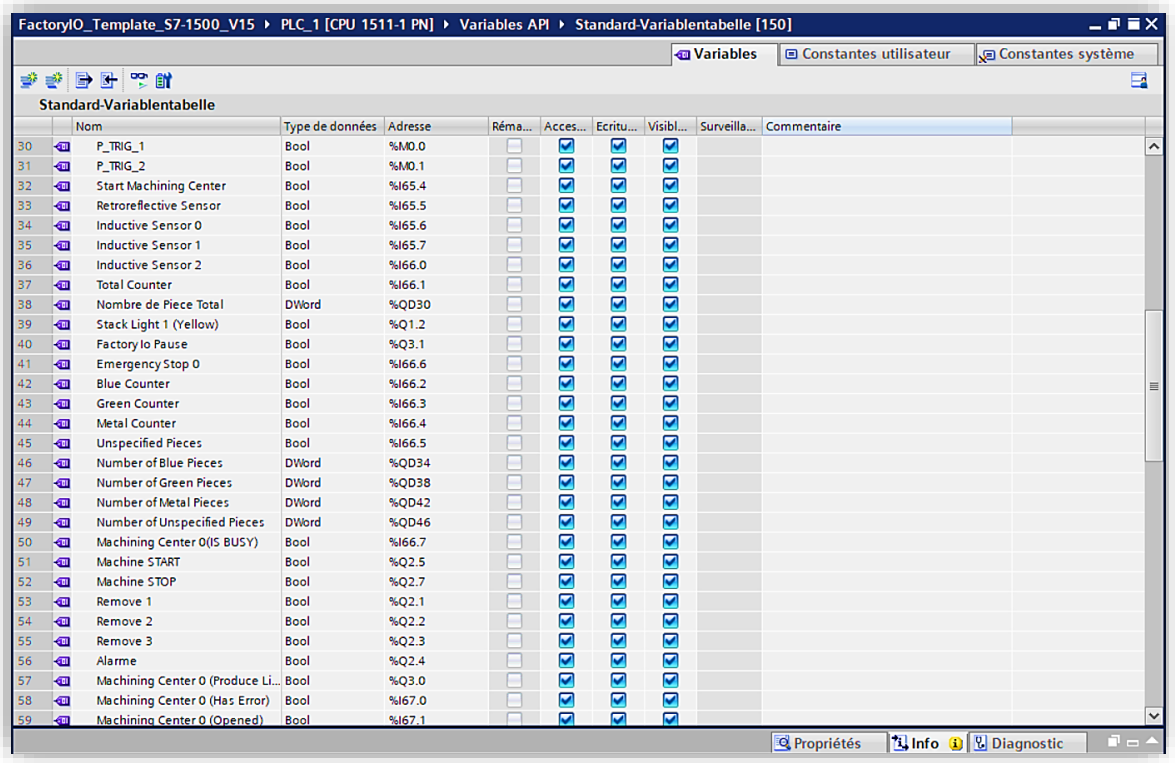


Figure III.6 : Table des variables API – Partie 2

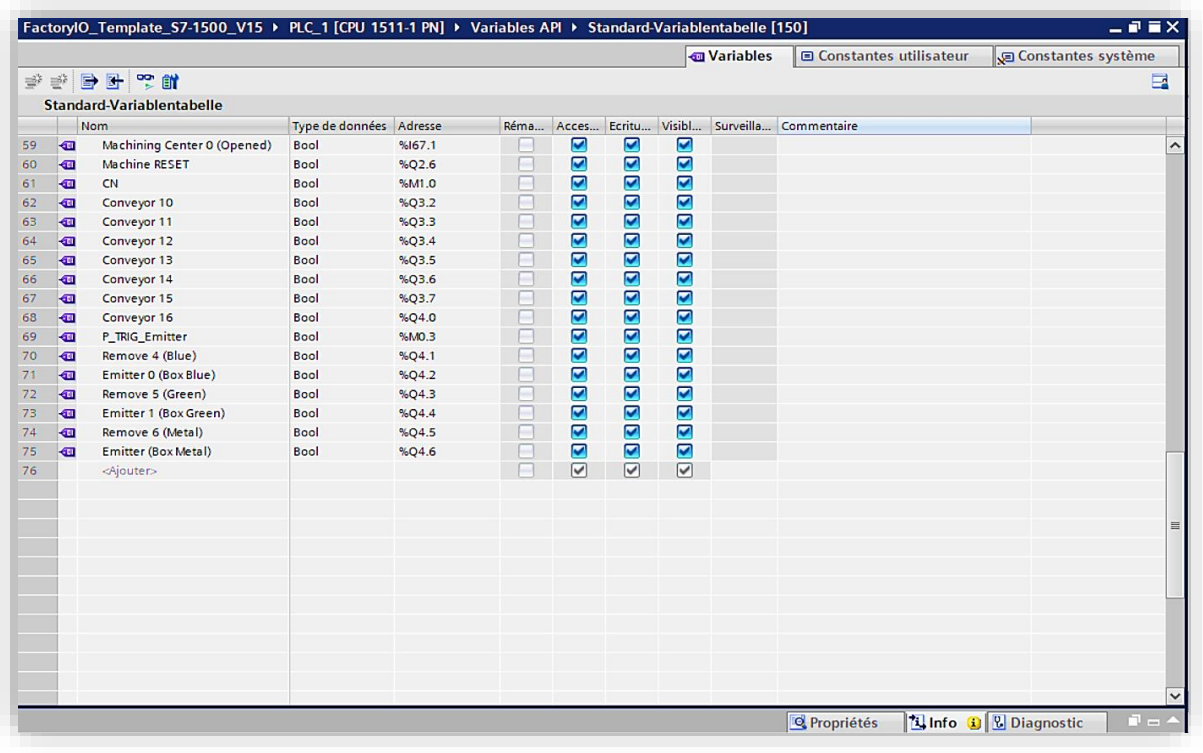


Figure III.7 : Table des variables API – Partie 3

III.6.5 Automatisation de la station (Programme Ladder)

Au sein de cette section, est présenté l'octroi d'automatisation de la station de tri, via le TIA Portal, de manière à venir avec l'utilisation du langage Ladder (LD), à savoir ce que nous allons traiter dans notre développement, à partir de ce développement-ci, cependant, doit ensuite, assurer la commande des différents éléments du système tels que les convoyeurs, les vérins, les capteurs et les compteurs.

Les aspects structurels généraux du programme (ceux-ci de façon générale et afin de s'y speclait) et ceux des blocs divers qui le compose seront mis en éléments de développement différenciée dans les Parties suivantes, donnant ainsi et pour ces différentes parties faisant appel à une composante spécifique du logiciel à traiter et que nous étudions en développement.

Partie 01 :

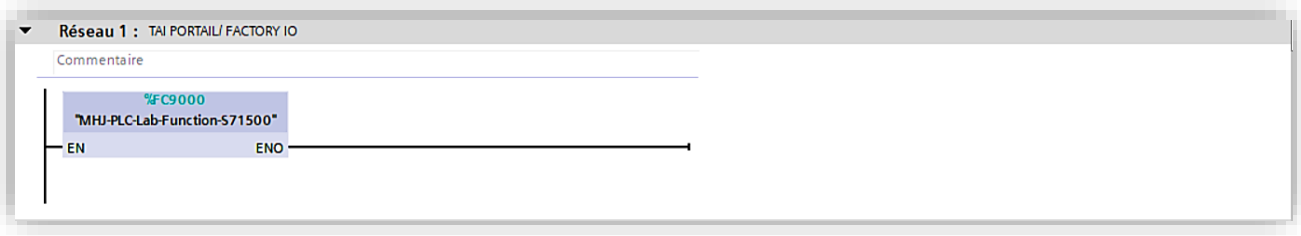


Figure III.8 : Initialisation et liaison TIA Portal – Factory I/O

- La figure qui précède représentait le Réseau 1 du programme Ladder. Ce réseau contenait le bloc MHJ-PLC-Lab-Function-S71500 (FC9000) utilisé pour gérer l'interface entre l'automate S71500 et l'environnement de simulation Factory I/O.
- Ce bloc était appelé dès le début du cycle du programme (via l'entrée EN), pour établir la communication entre les entrées/sorties configurées dans TIA Portal et les éléments simulés dans Factory I/O (capteurs, actionneurs, convoyeurs, etc.).
- Il était déterminant dans la synchronisation des signaux entre le programme automate et le système simulé pour garantir un fonctionnement cohérent de l'ensemble de l'installation.

Partie 02 :

La figure présente le Réseau 2 du programme Ladder, consacré à la gestion du démarrage et de l'arrêt du système.

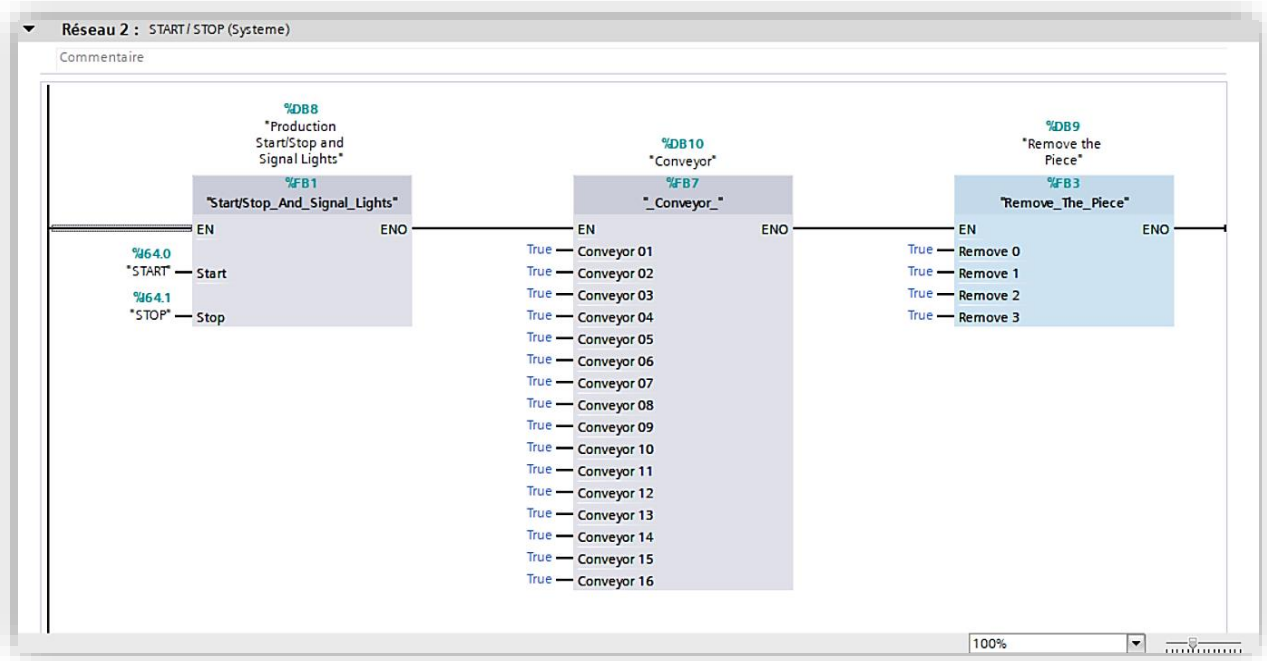


Figure III.9 : Logique de contrôle du fonctionnement global du système

- **Bloc [Start/Stop_And_Signal_Lights] (FB1):**

❖ ***Réseau 01 :***

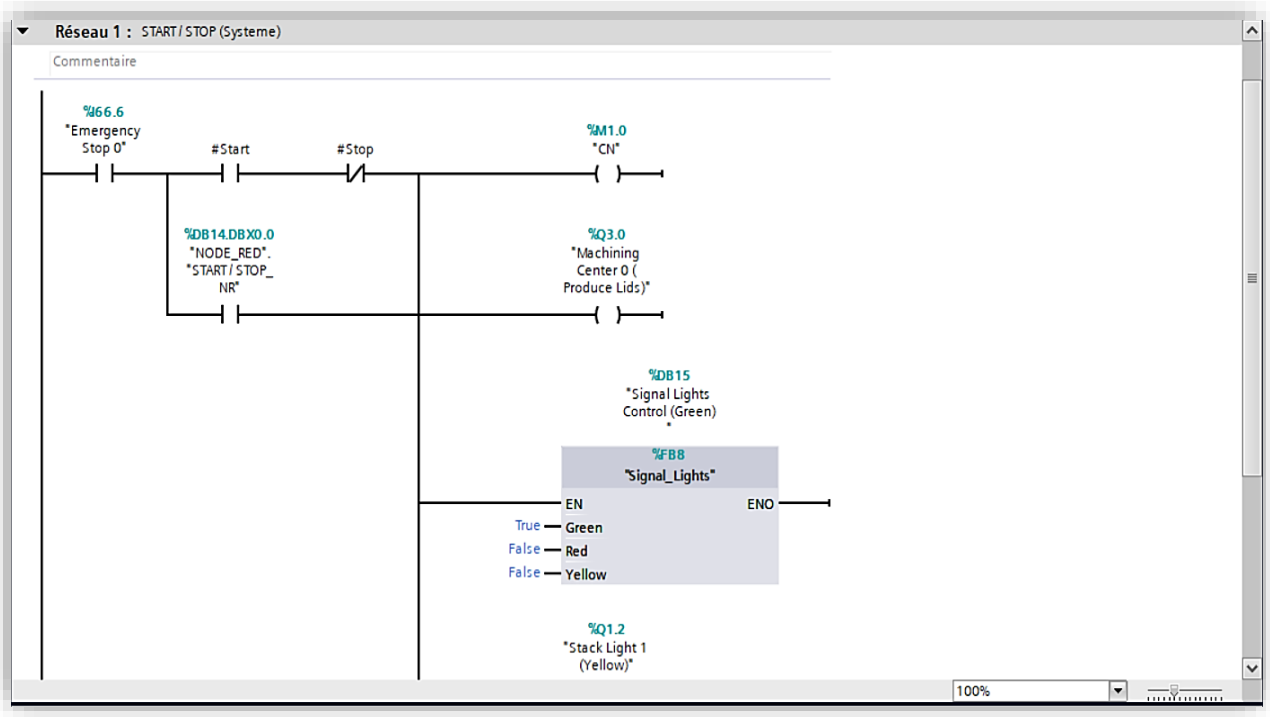


Figure III.10 : Gestion du démarrage, de l'arrêt et des feux de signalisation

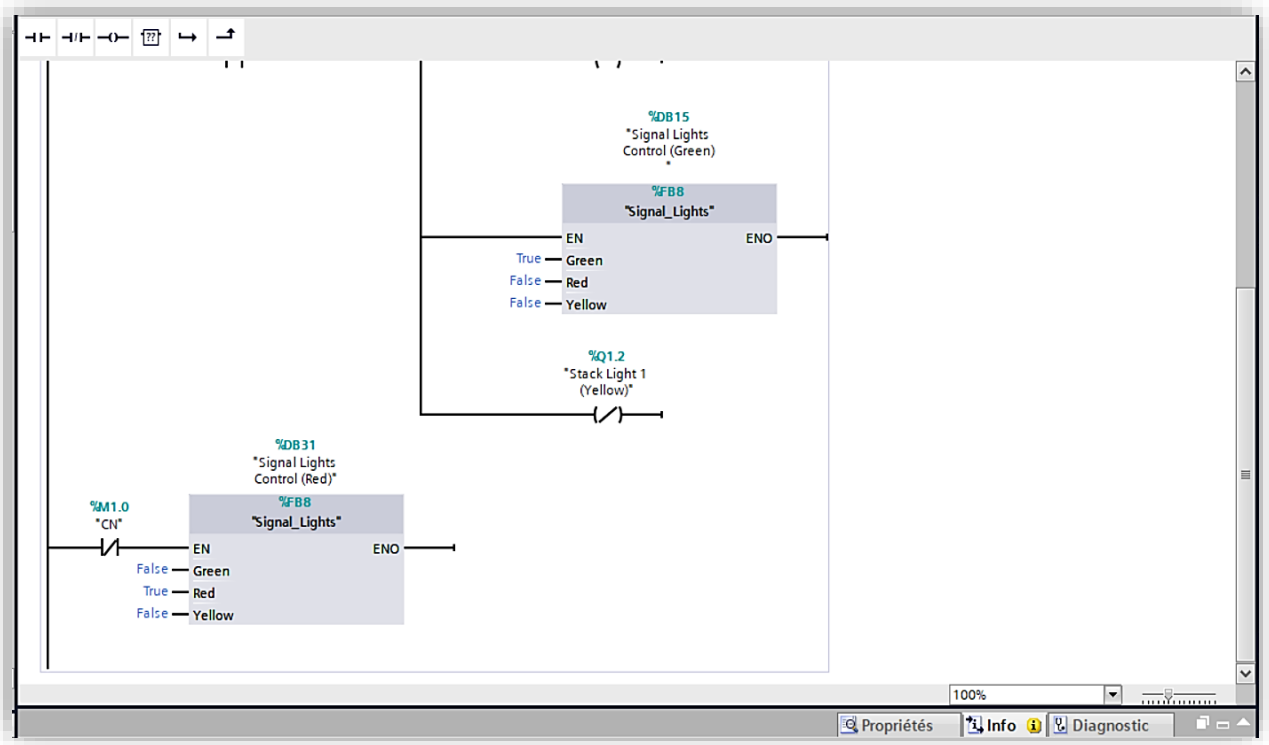


Figure III.11 : Gestion du démarrage, de l'arrêt et des feux de signalisation (la suite)

Description :

- Le rôle principal de ce réseau est d'effectuer la commande générale du système automatisé, ce qui permet d'assurer la mise sous tension et l'arrêt de l'installation en toute sécurité.

  Il prend en compte :

- Le bouton Start pour mettre en route une production,
- Le bouton Stop pour arrêter le système,
- L'arrêt d'urgence pour éviter les situations critiques,
- La commande à distance via Node-RED.
- Lorsqu'une condition pour démarrer est valide, la variable interne fonctionnelle (CN) s'active pour ainsi permettre l'exécution des autres branches du programme (convoyeurs, vérins, production, …), alors que cette variable désactivée dans le cas d'un arrêt ou d'un arrêt d'urgence arrête tout le système.

- **Bloc [Signal_Lights] (FB8) :**

  ❖ ***Réseau 01 :***

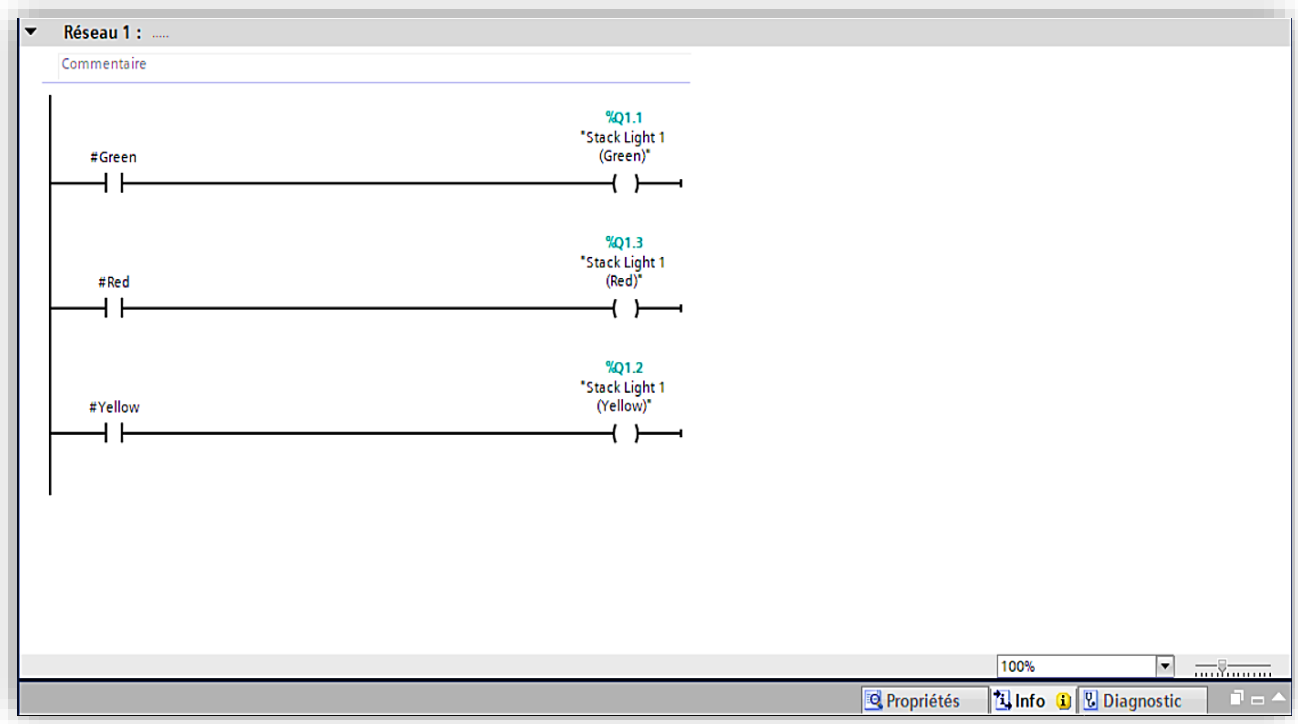


Figure III.12 : Gestion des feux de signalisation (Vert, Rouge, Jaune)

Description :

Ce réseau a pour objectif d'assurer la signalisation visuelle de l'état du système à l'aide d'une colonne lumineuse (Stack Light).

- Chaque couleur indique une condition précise :
  - Vert : système en fonctionnement normal.
  - Rouge : système à l'arrêt.
  - Orange : système en alarme ou en défaut.

Ce code permet donc d'informer rapidement l'opérateur sur l'état de l'installation et d'améliorer la sécurité ainsi que la réactivité en cas de problème.

- **Bloc [Conveyor] (FB7):**

❖ ***Réseau 01 :***

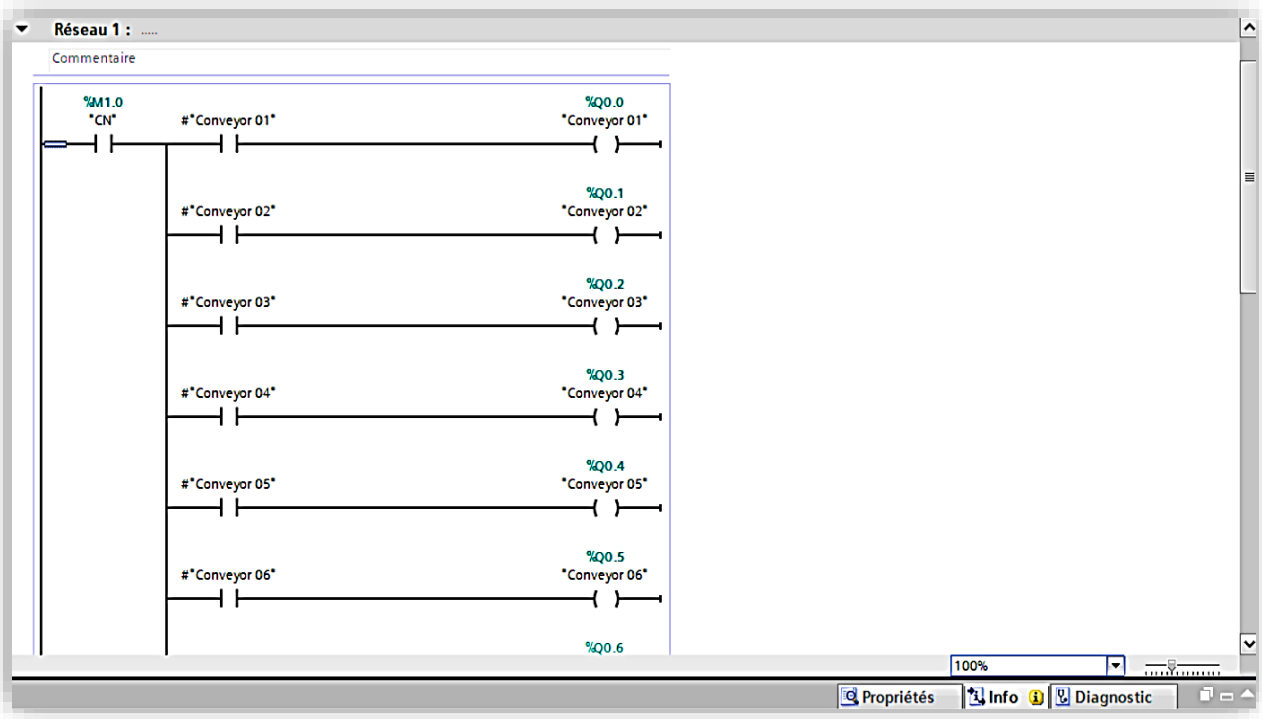


Figure III.13 : Activation des convoyeurs via condition générale (CN)

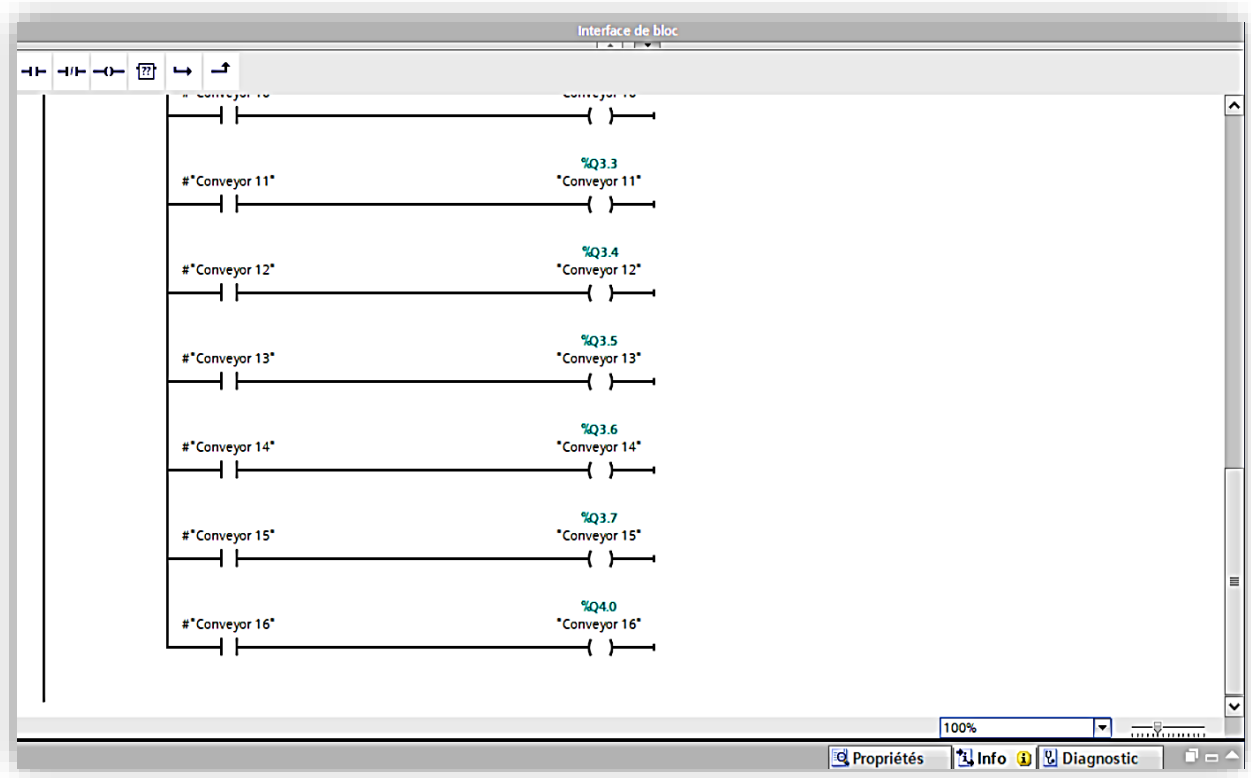


Figure III.14 : Activation des convoyeurs via condition générale (CN) - (la suite)

Description :

- La figure présentée ici représente les différentes fonctions qui sont assurées par ce système :
  - La prise en charge de la commande des convoyeurs.
  - La synchronisation de l'asservissement des convoyeurs avec l'état général (CN).
  - L'admission du transport des pièces en continu dans la station.
  - L'arrêt immédiat des convoyeurs lorsque le système est à l'arrêt.
  - La bonne distribution des pièces entre les différentes zones.

- **Bloc [Remove_The_Piece] (FB3):**

  - ***Réseau 01 :***

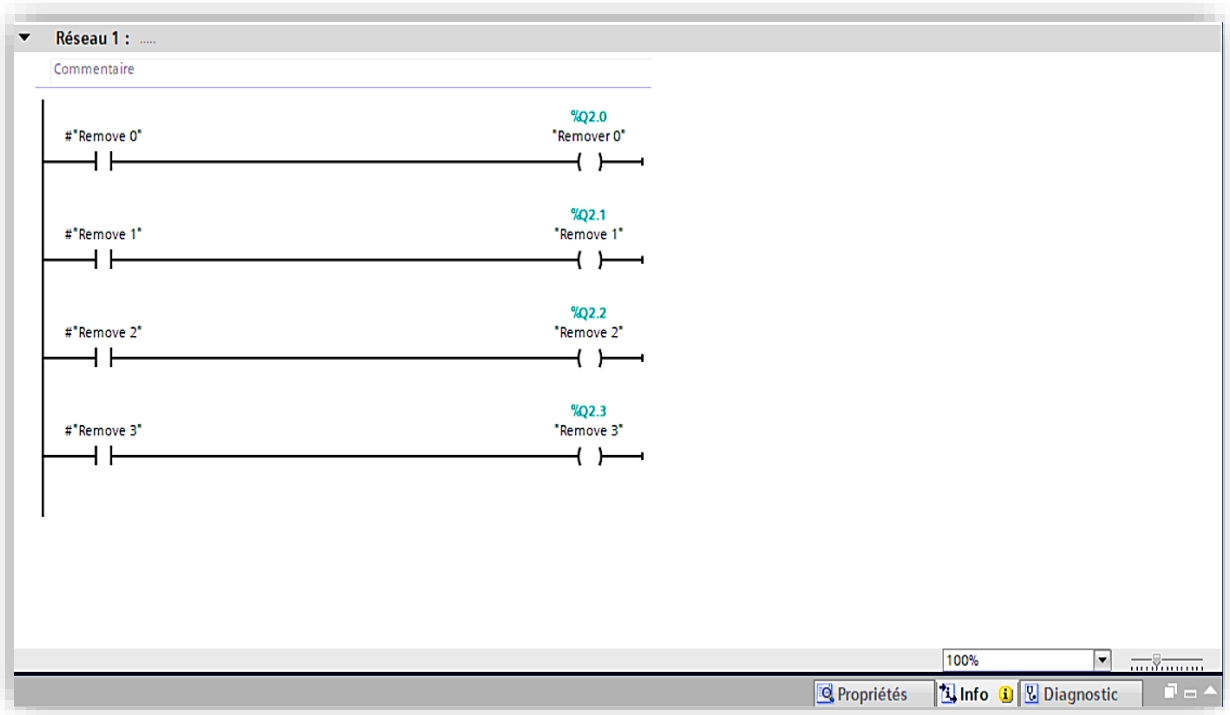


Figure III.15 : Gestion des mécanismes de retrait des pièces

Description :

- La figure vise les fonctions ci-dessous :
  - Exécuter le commandement direct des sorties Remove 0 à Remove 3
  - Activer chaque sortie (%Q2.0 à %Q2.3) à chaque fois que le signal correspondant (#Remove 0 à #Remove 3) est actif
  - Permettent d'activer les mécanismes de retrait associés aux actionneurs
  - Assurent le contrôle et la supervision des actionneurs de retrait.

Partie 03 :

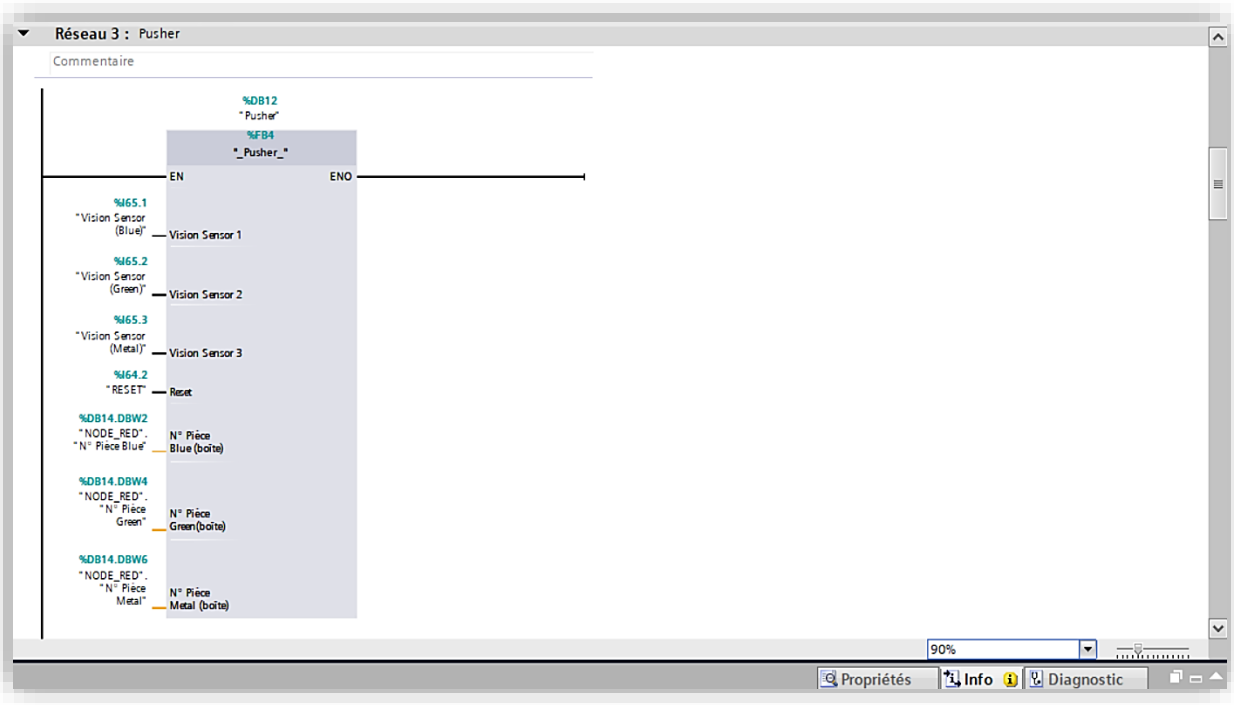


Figure III.16 : Gestion automatique des vérins de tri (Pusher)

- **Bloc [_Pusher_] (FB4):**

  - ***Réseau 01 :***

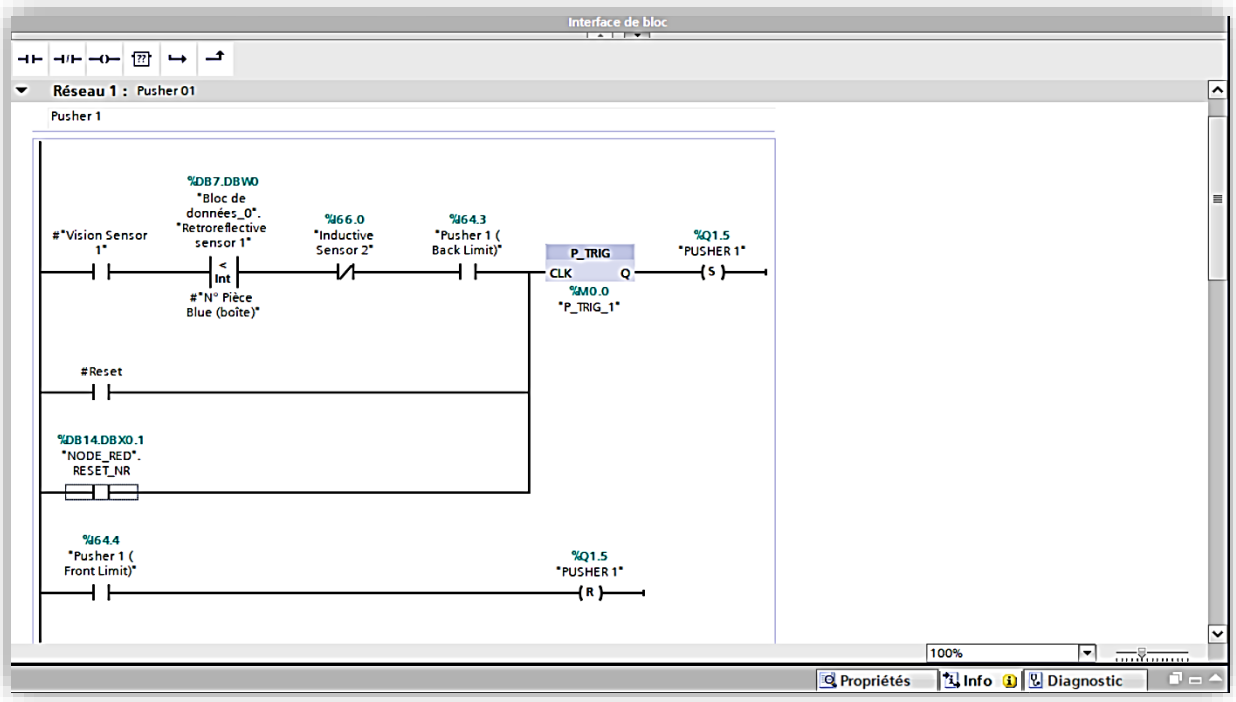


Figure III.17 : Logique de pilotage du vérin (Pusher 01)

Description :

- Détecter la pièce bleue.
- Vérifier que le nombre demandé n'a pas été atteint.
- Contrôler que le vérin est en position arrière.
- Envoyer une impulsion (P_TRIG) pour activer %Q1.5 (PUSHER 1).
- Réinitialiser le vérin après activation du capteur avant.

✓ **But :** Diriger les pièces bleues dans la bonne direction.

❖ ***Réseau 02 :***

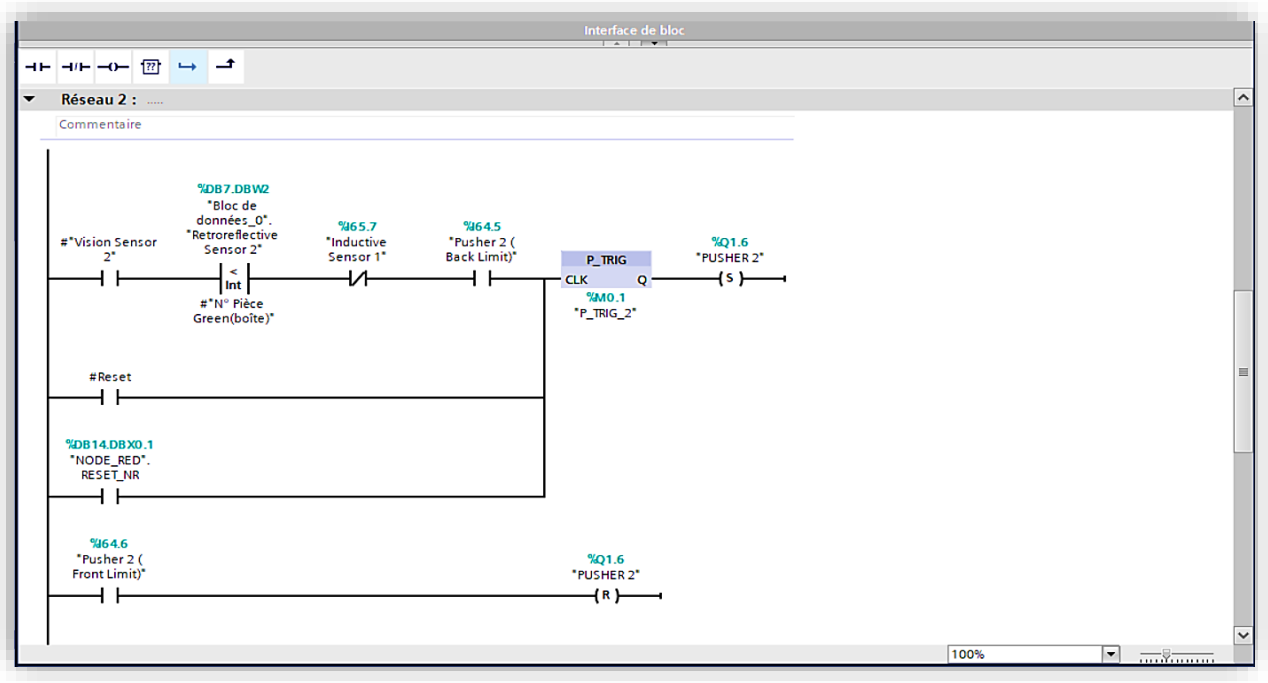


Figure III.18 : Logique de pilotage du vérin (Pusher 02)

Description :

- Détecte la pièce verte.
- Vérifie la quantité programmée.
- S'assure que le vérin est prêt (Back Limit).
- Active %Q1.6 (PUSHER 2) par impulsion.
- Reset automatique après fin de course avant.

✓ **But :** Diriger les pièces vertes vers la direction correspondante.

❖ ***Réseau 03 :***

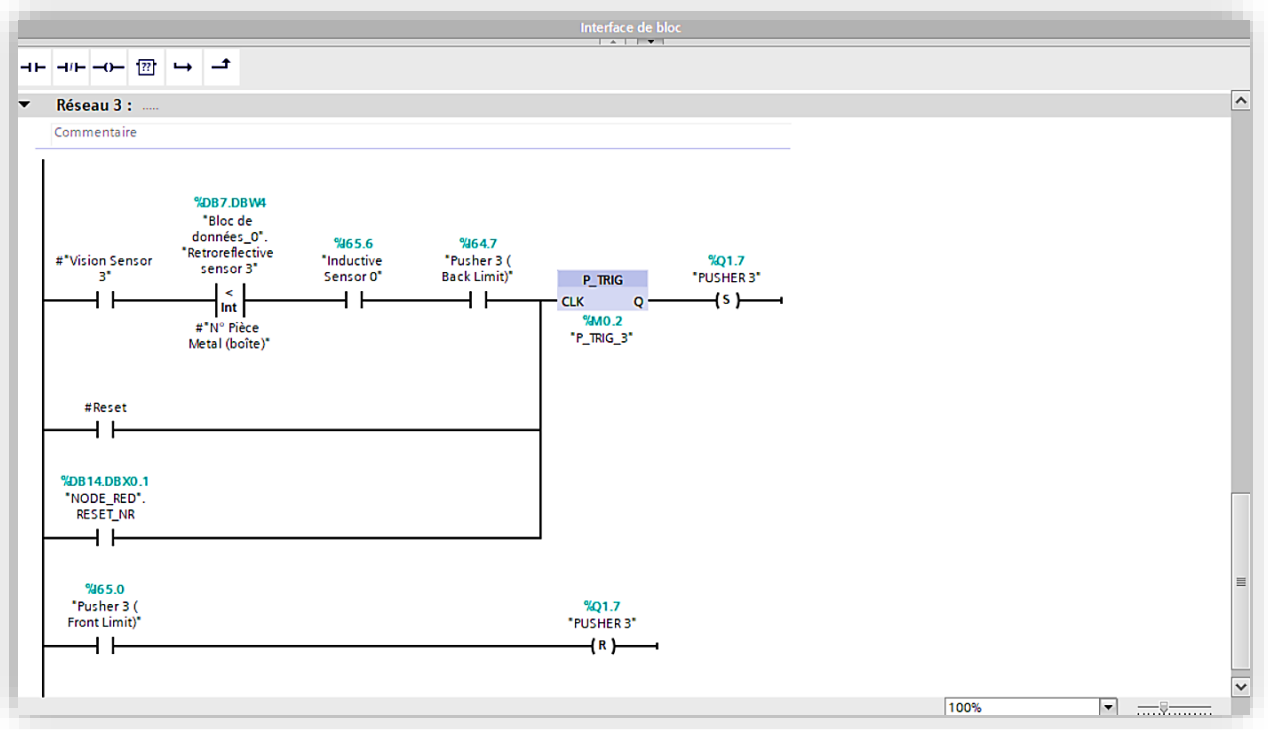


Figure III.19 : Logique de pilotage du vérin (Pusher 03)

Description :

- Détecte la pièce métallique.
- Vérifie que le nombre requis n'est pas atteint.
- Confirme la position arrière du vérin.
- Active %Q1.7 (PUSHER 3) via P_TRIG.
- Réinitialise le vérin après détection fin de course avant.

✓ **But :** Orienter les pièces métalliques vers la direction adaptée.

Partie 04 :

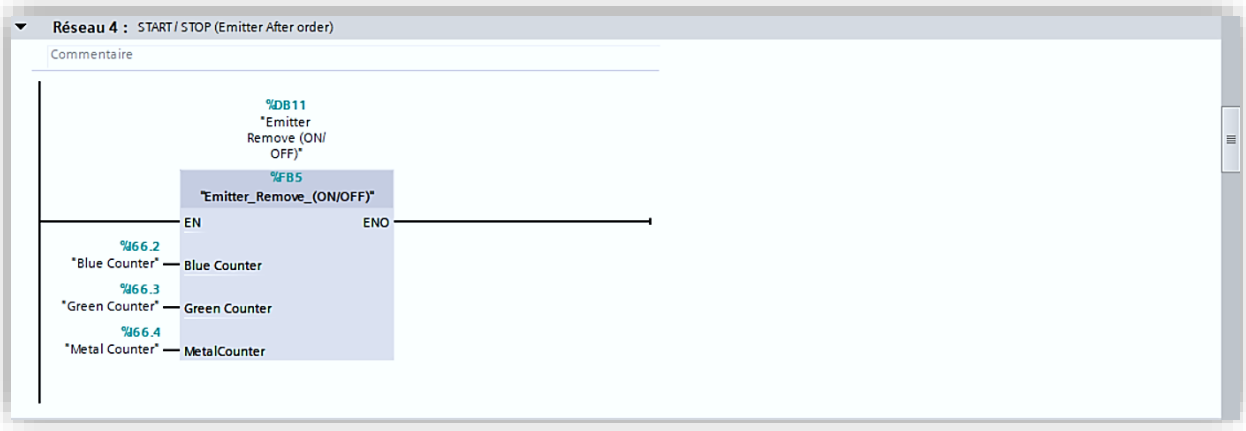


Figure III.20 : Gestion du démarrage/arrêt de (émetteur/Retirer)

- **Bloc [Emitter_Remove_(ON/OFF)] (FB5):**

  - ***Réseau 01 :***

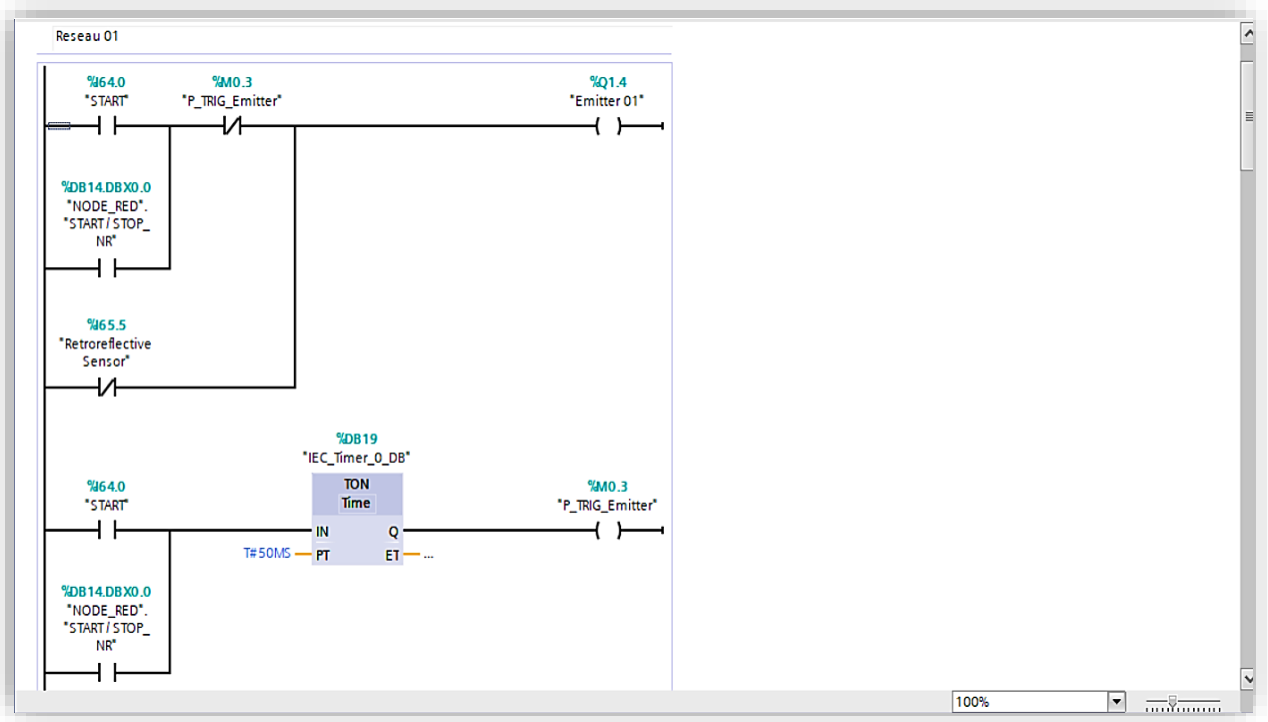


Figure III.21 : Logique de pilotage de l'émetteur principal

Description :

- Au début : une pièce sort dès qu'on appuie sur START.
- Ensuite : à chaque détection d'une pièce par le capteur, l'émetteur relance une nouvelle pièce.
- Le time (50 ms) sert à créer une impulsion propre pour éviter les déclenchements multiples.

❖ ***Réseau (02 + 03 + 04 + 05 + 06 + 07) :***

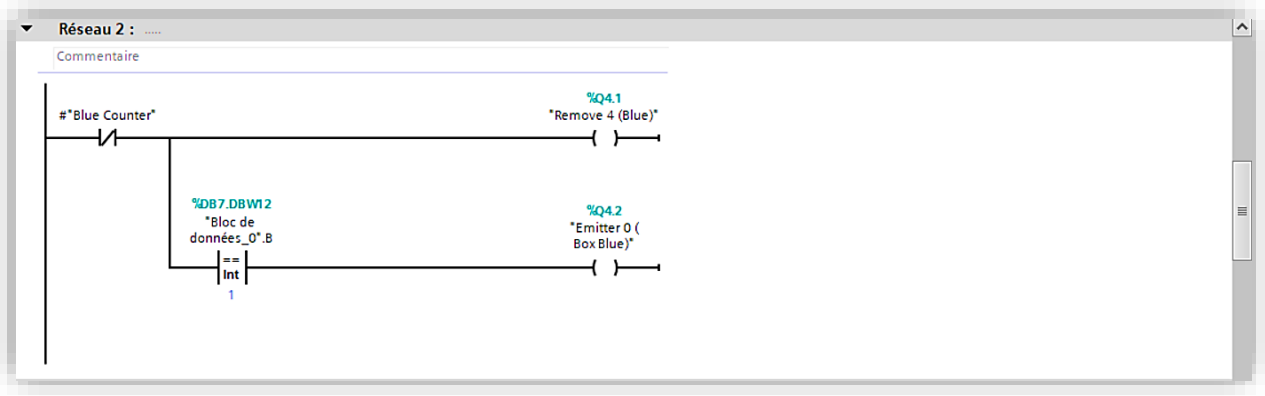


Figure III.22 : Génération d'une boîte bleue pour chaque 2 pièces produites

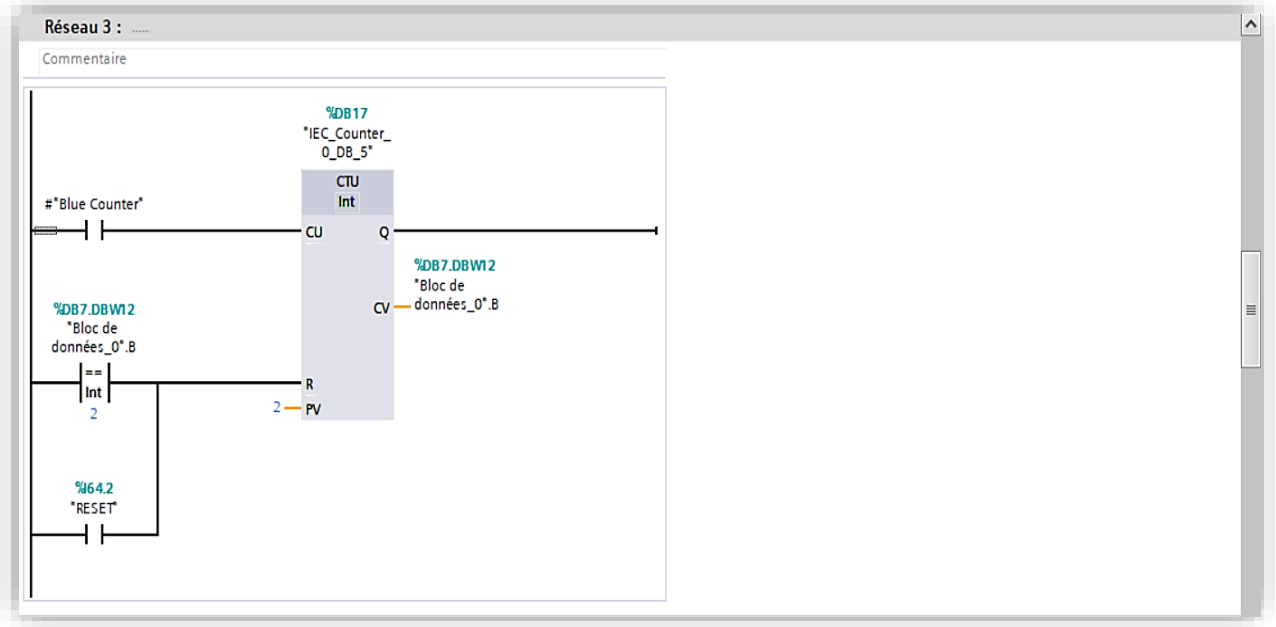


Figure III.23 : Compteur des pièces bleues

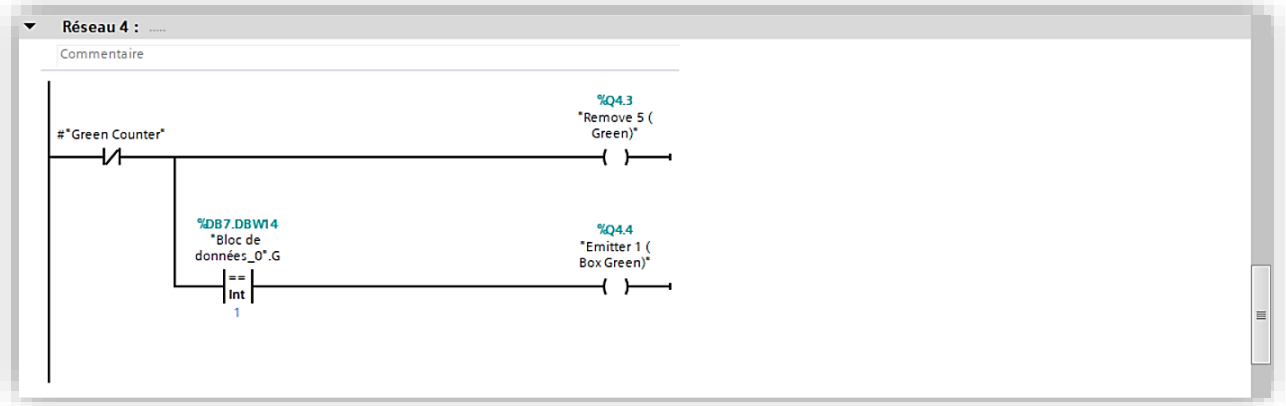


Figure III.24 : Génération d'une boîte Verte pour chaque 2 pièces produites

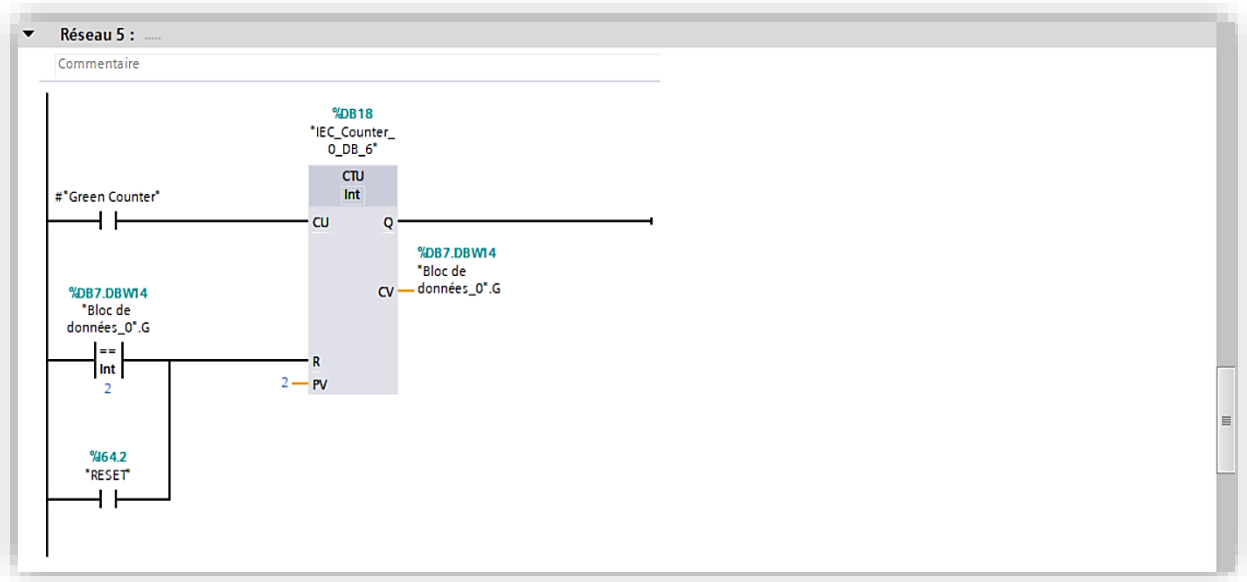


Figure III.25 : Compteur des pièces Vertes

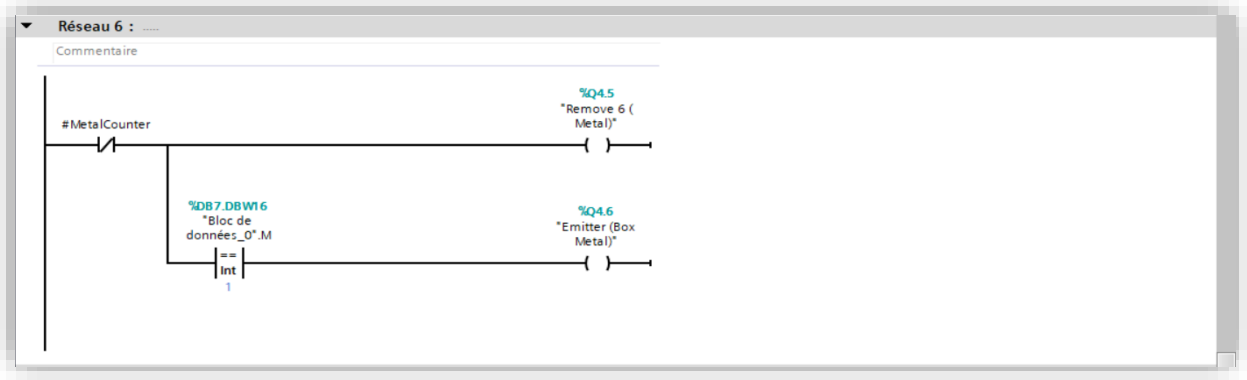


Figure III.26 : Génération d'une boîte métallique pour chaque 2 pièces produites

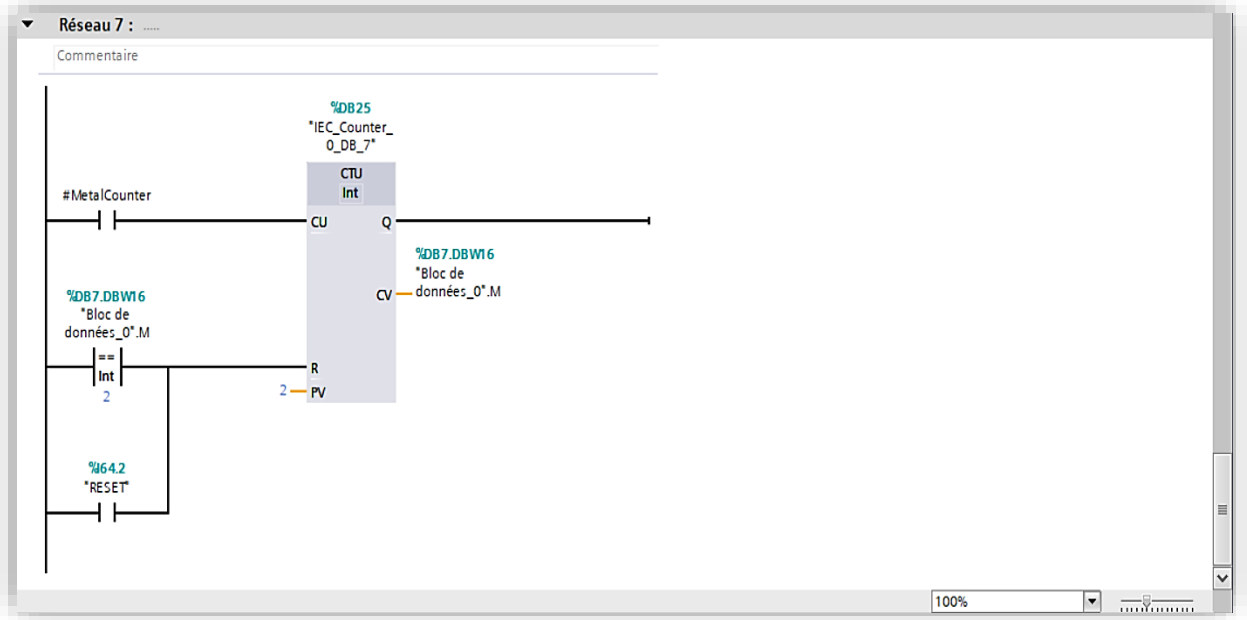


Figure III.27 : Compteur des pièces métalliques

Description :

- Le programme est structuré en plusieurs réseaux, chacun dédié à une couleur (Bleu, Vert, Métal).
- Chaque couleur possède un compteur de type CTU avec une valeur préréglée PV = 2.
- À chaque détection de pièce, le compteur correspondant s'incrémente.
- Lorsque le compteur atteint 2 pièces, la sortie Q du compteur s'active.
- L'activation de Q commande l'émetteur (Emitter) pour générer un BOX correspondant.
- Après la création du BOX, le compteur est réinitialisé (Reset).
- Le cycle se répète automatiquement.

Partie 05 :

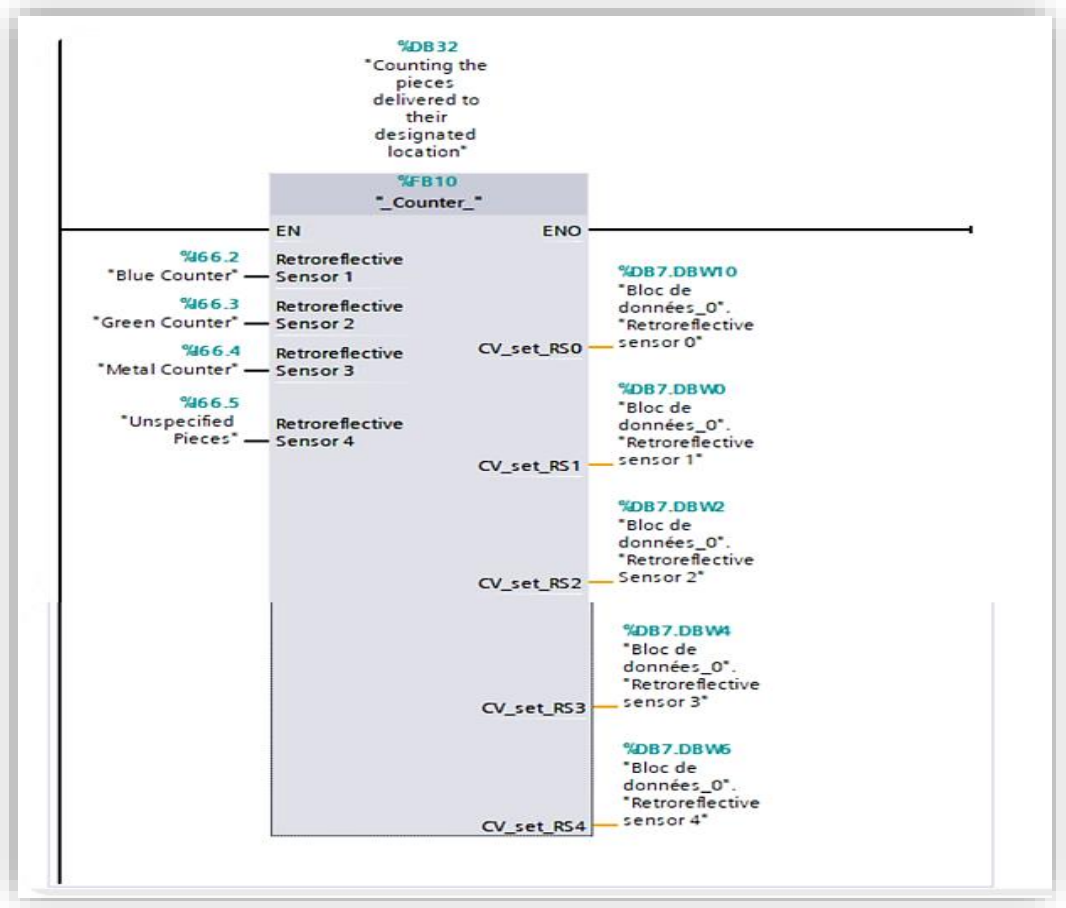


Figure III.28 : Comptage des pièces selon leur destination

- **Bloc [Counter] (FB10):**
  - ❖ ***Réseau 01 :***

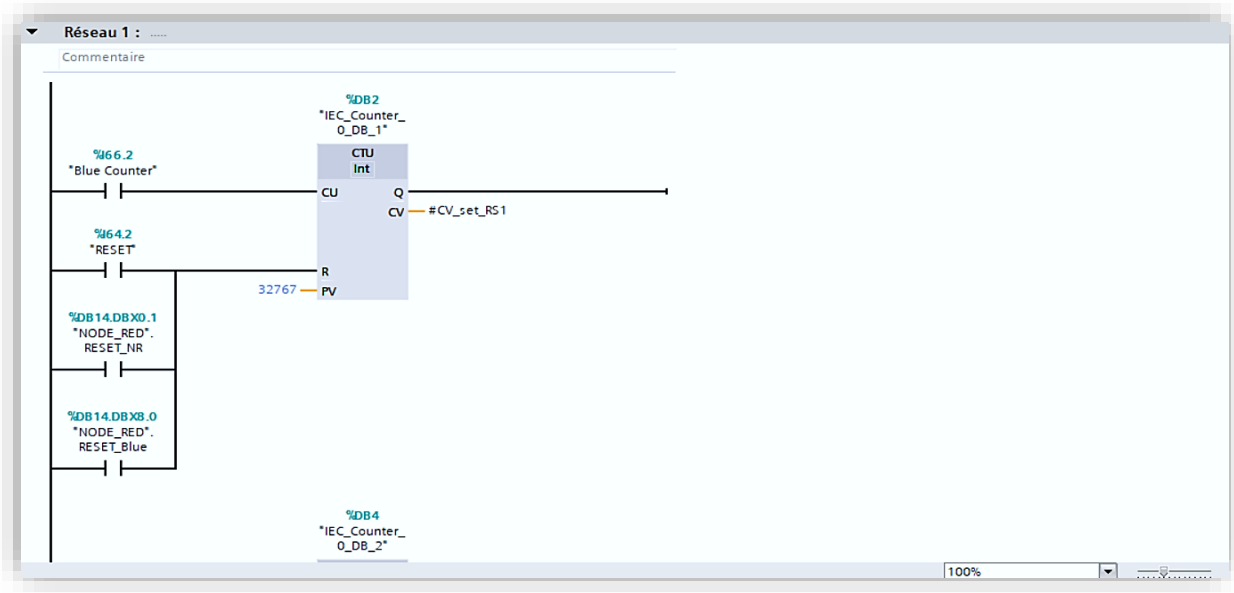


Figure III.29 : Compteur des pièces bleues avec gestion du Reset

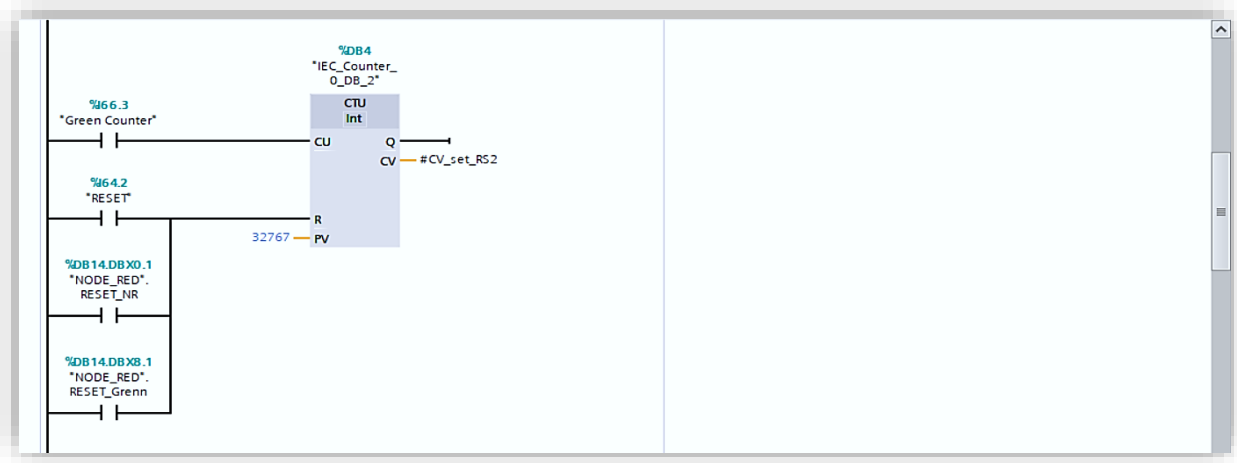


Figure III.30 : Compteur des pièces Vertes avec gestion du Reset

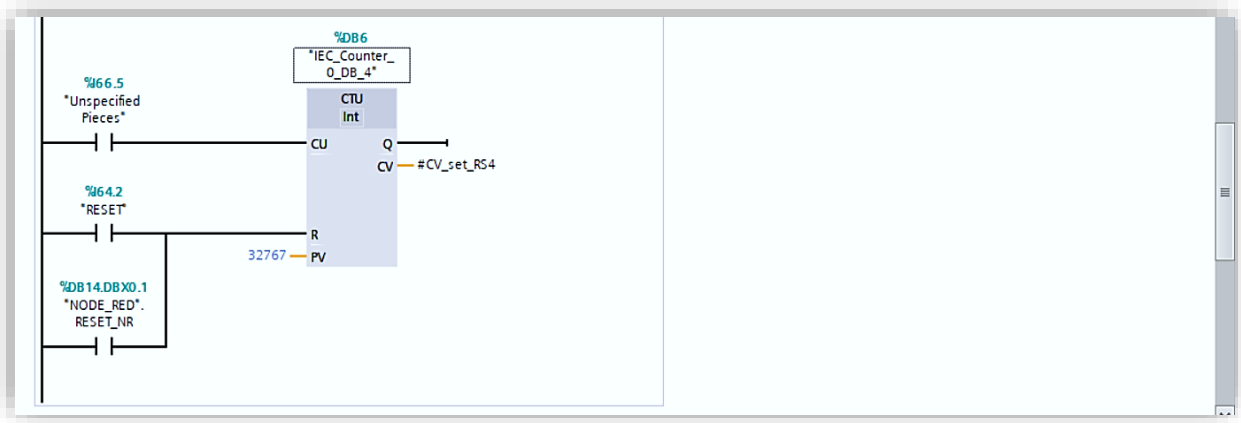


Figure III.31 : Compteur des pièces métalliques avec gestion du Reset

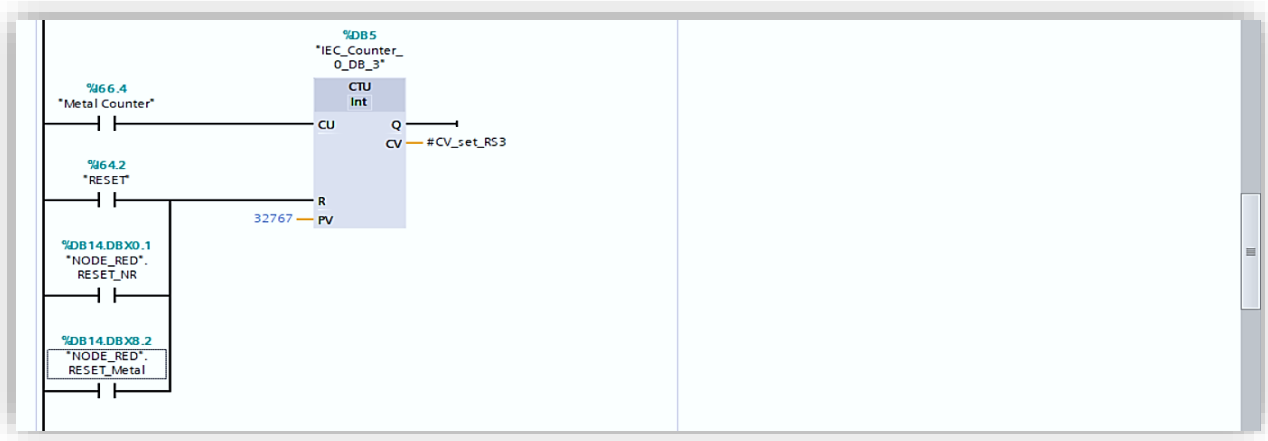


Figure III.32 : Compteur des pièces non définies avec gestion du Reset

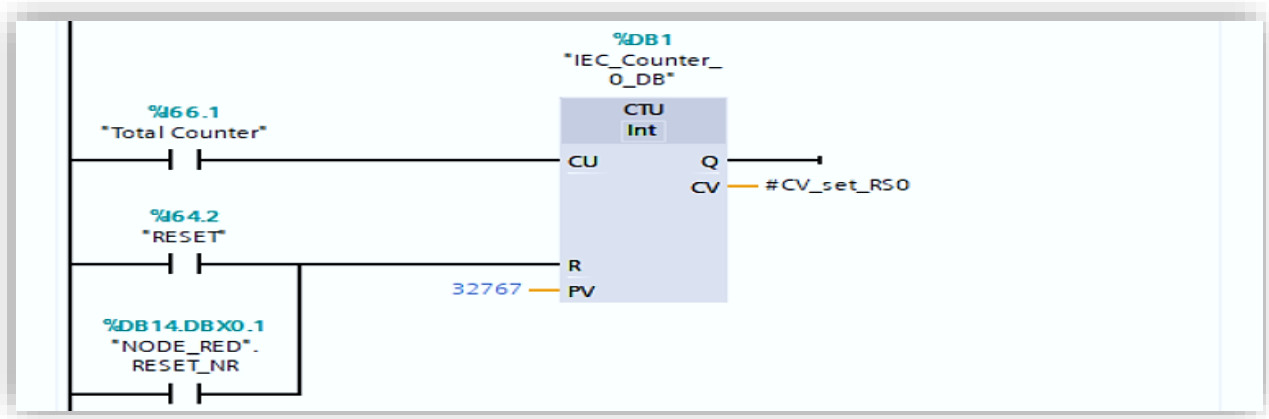


Figure III.33 : Compteur total des pièces (CTU)

Description :

- Le système utilise des compteurs CTU pour compter les pièces (bleues, métalliques, non spécifiées et total).
- Chaque compteur s'incrémente automatiquement lors de la détection d'une pièce par son capteur.
- La valeur actuelle (CV) est stockée dans des variables pour le suivi de production.
- La valeur maximale (PV = 32767) permet un comptage continu.
- Les compteurs peuvent être réinitialisés via le bouton RESET, Node-RED (RESET_NR) ou un reset spécifique.
- Ces compteurs assurent le suivi en temps réel et la gestion efficace de la production.

❖ ***Réseau 02 :***

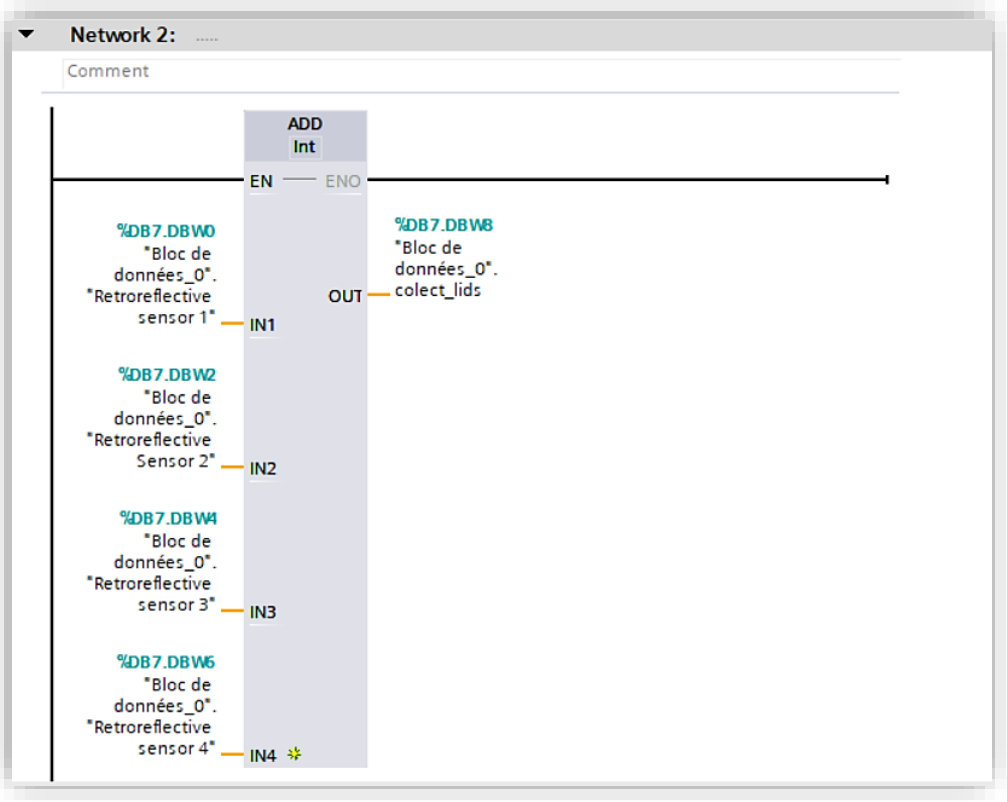


Figure III.34 : Addition des capteurs – Total des pièces

Description :

- Ce réseau utilise le bloc ADD (Int) pour effectuer une opération d'addition.
- Les entrées (IN1 à IN4) proviennent des capteurs rétro-réfléchissants stockés dans le DB7.
- Chaque entrée représente une valeur détectée (nombre de pièces).
- Le résultat (OUT) est enregistré dans la variable : collect_lids (%DB7.DBW8)

Partie 06 :

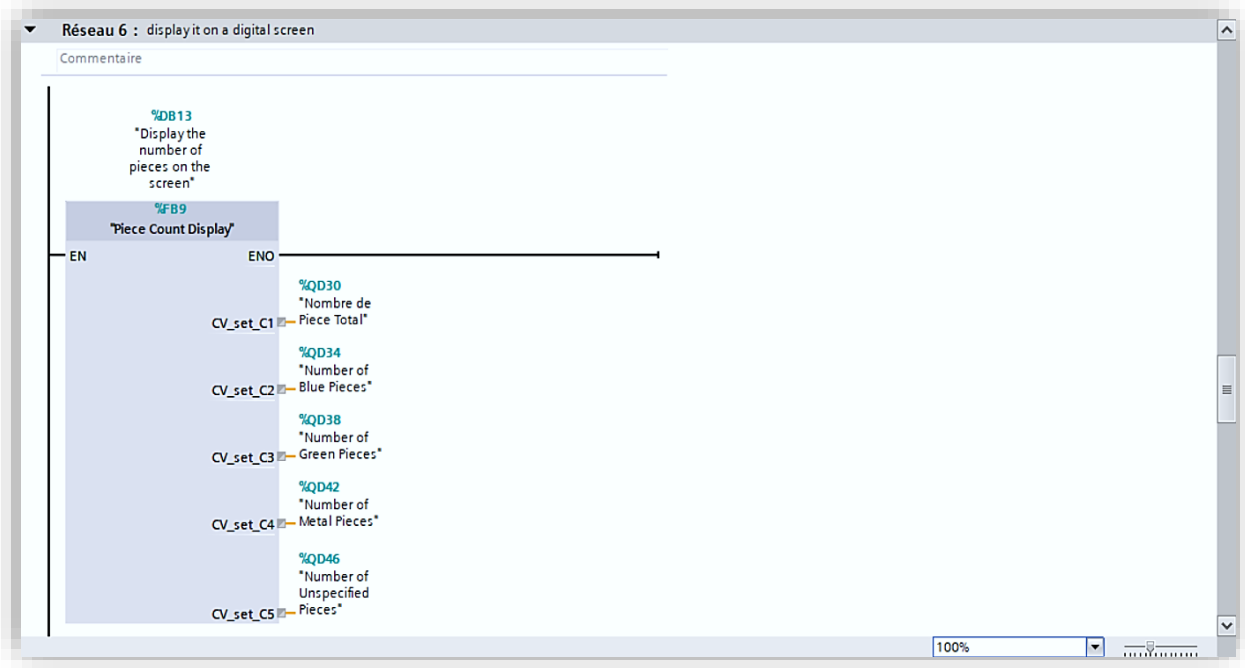


Figure III.35 : Système d'affichage des quantités produites

- **Bloc [Piece_Count_Display] (FB9):**

  - ***Réseau 01 :***

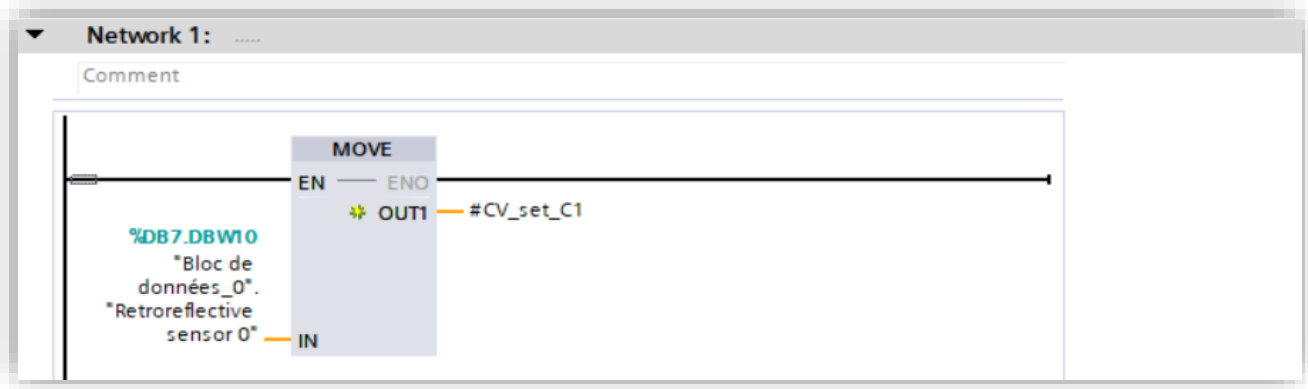


Figure III.36 : Comptage global des pièces et transfert des valeurs vers les variables d'affichage

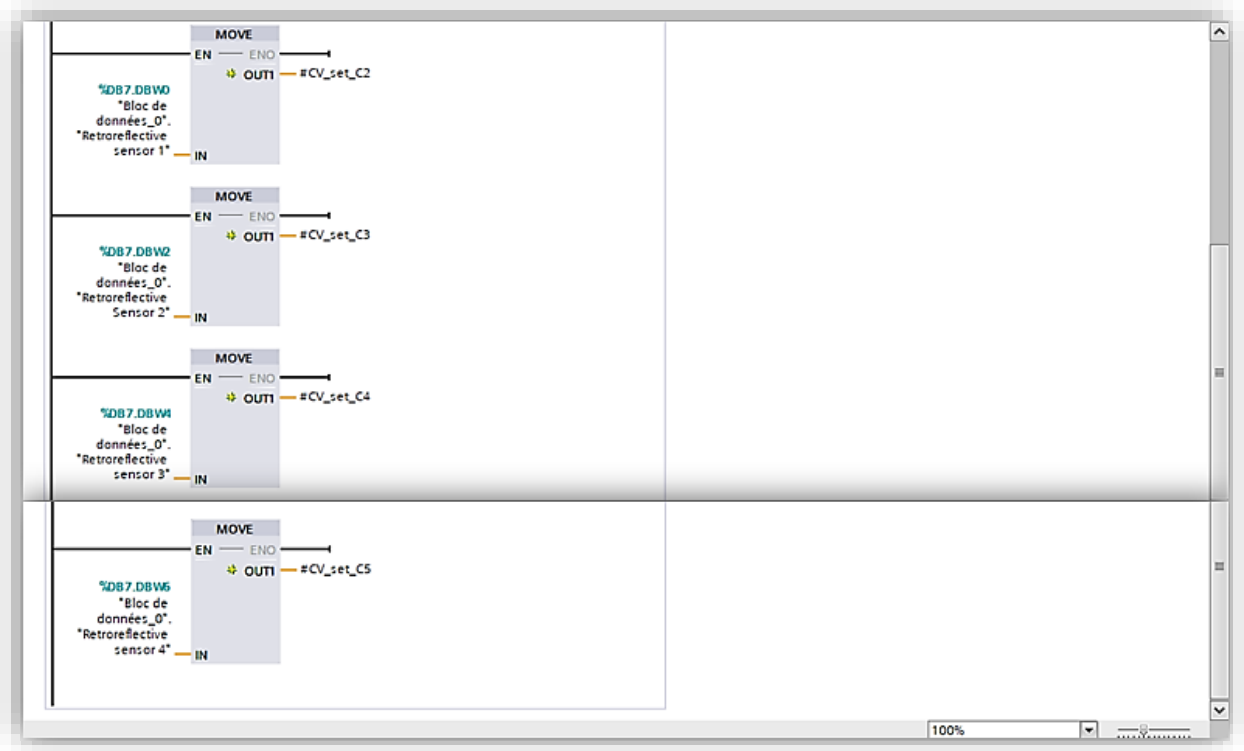


Figure III.37 : Comptage global des pièces et transfert des valeurs vers les variables d'affichage (la suite)

Description :

- Il reçoit les valeurs des compteurs :
  - CV_set_C1 → Nombre total de pièces
  - CV_set_C2 → Nombre de pièces bleues
  - CV_set_C3 → Nombre de pièces vertes
  - CV_set_C4 → Nombre de pièces métal
  - CV_set_C5 → Nombre de pièces non spécifiées
- Les valeurs sont envoyées vers :
  - %QD30 (Total)
  - %QD34 (Blue)
  - %QD38 (Green)
  - %QD42 (Metal)
  - %QD46 (Unspecified)

✓ ***But :*** Afficher en temps réel le nombre de pièces sur l'écran digital.

Partie 07 :

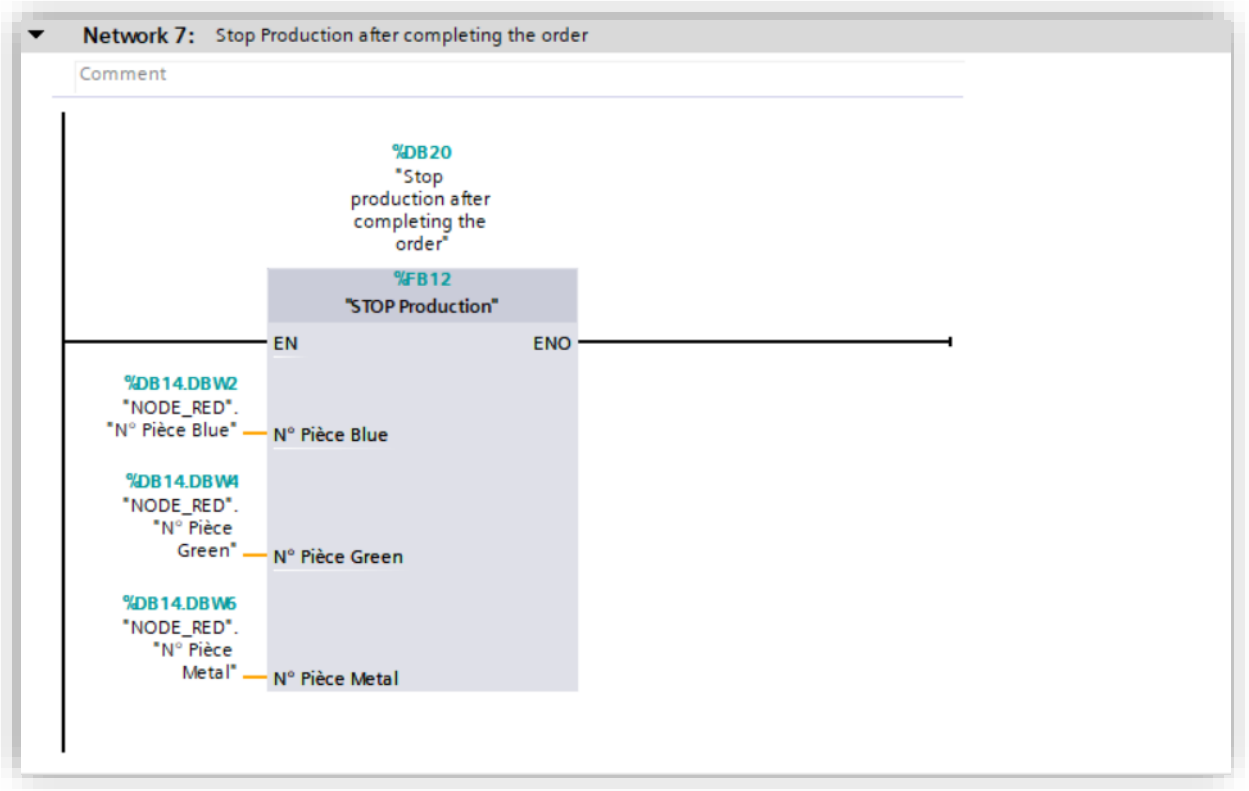


Figure III.38 : Arrêt automatique de la production après atteinte des quantités demandées

- **Bloc [STOP Production] (FB12):**

  - ***Réseau 01 :***

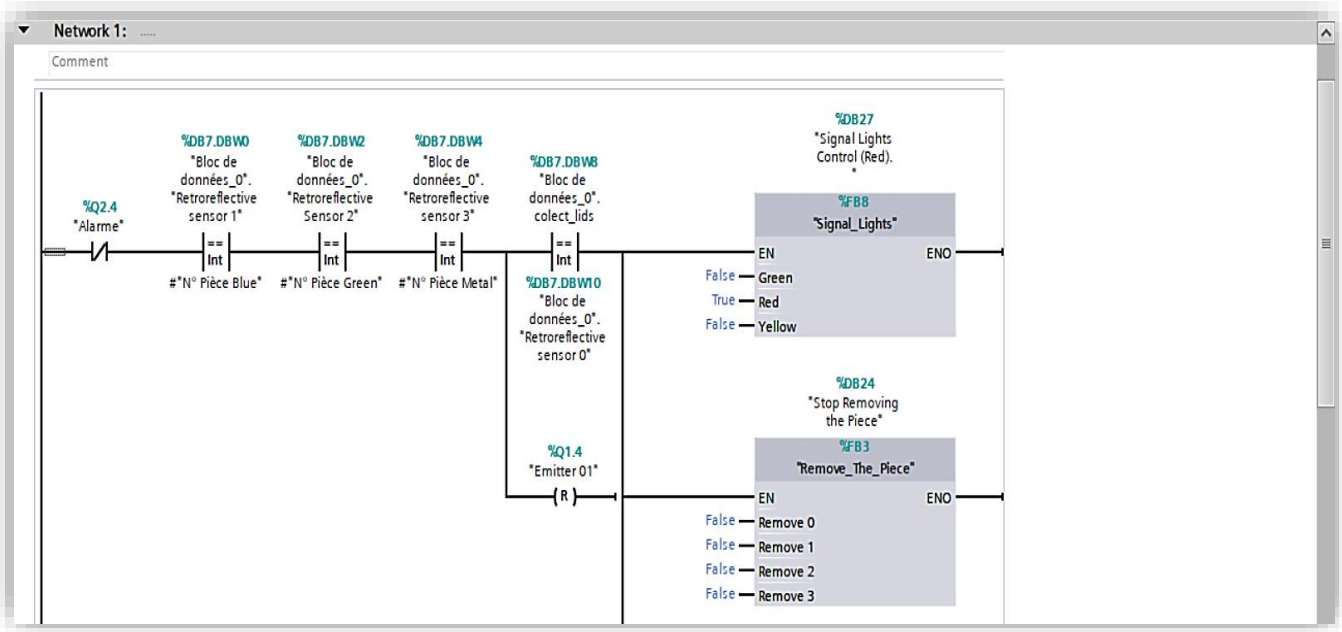


Figure III.39 : Arrêt du système en fin de production

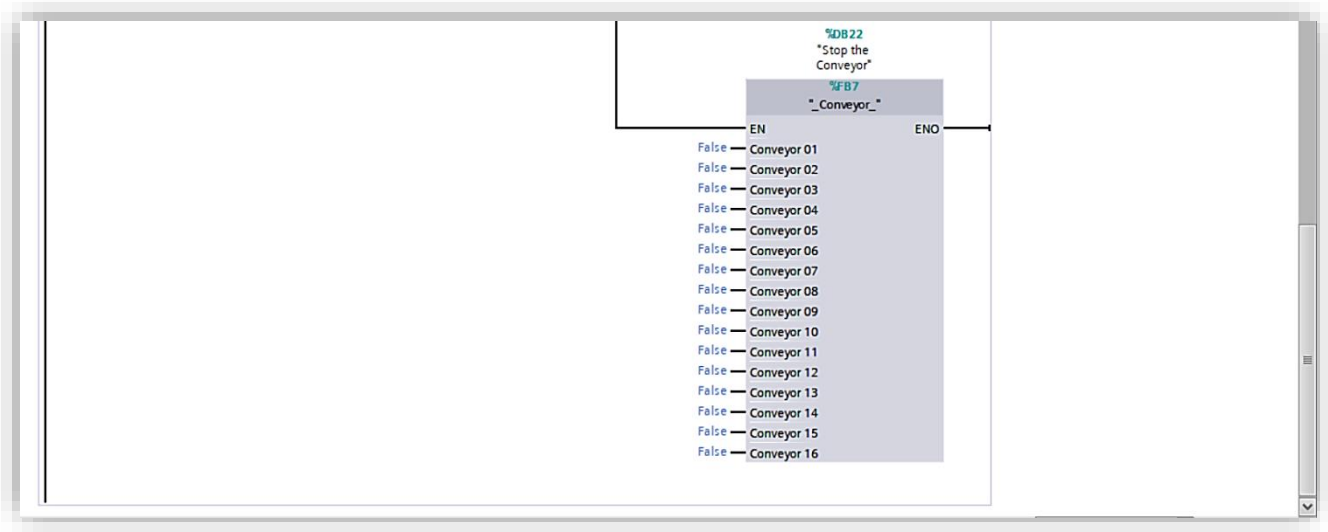


Figure III.40 : Arrêt du système en fin de production (la suite).

Description :

- Ce réseau surveille la production en comparant les valeurs réelles avec les valeurs demandées.
- Lorsque la quantité demandée est atteinte (commande complétée) → le système passe en état d'arrêt.
- En cas de fin de production :
  - Le bloc Signal_Lights (FB8) active la signalisation :
    - Jaune = fin de production / système arrêté
    - Vert et Rouge désactivés
  - Le bloc Remove_The_Piece (FB3) :
    - Désactive les mécanismes de retrait des pièces
    - Met à OFF les sorties Remove 0 à Remove 3
  - Le système agit aussi sur :
    - Emitter 01 qui est arrêté (plus d'émission de pièces)
  - Le bloc Conveyor (FB7) :
    - Arrête tous les convoyeurs
    - Stoppe le transport des pièces dans toute la station

Partie 08 :

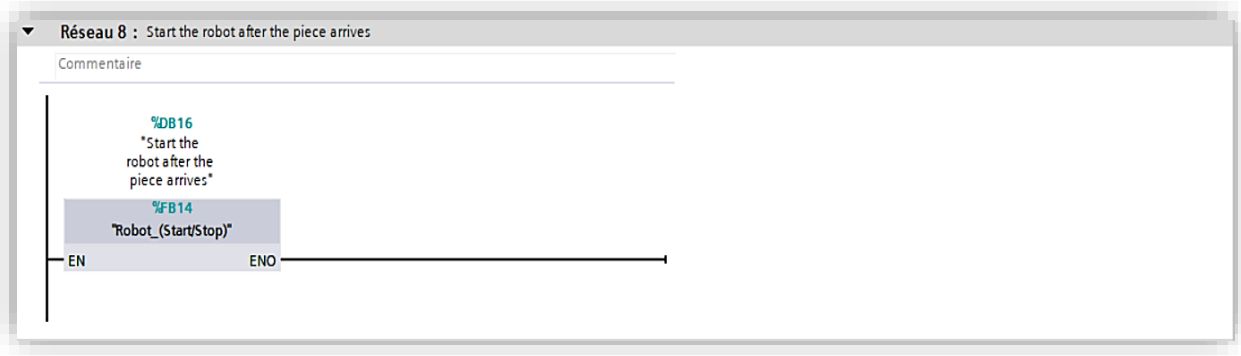


Figure III.41 : Bloc fonctionnel de commande du robot

- **Bloc [Robot (Start/Stop)] (FB14):**

❖ ***Réseau 01 :***

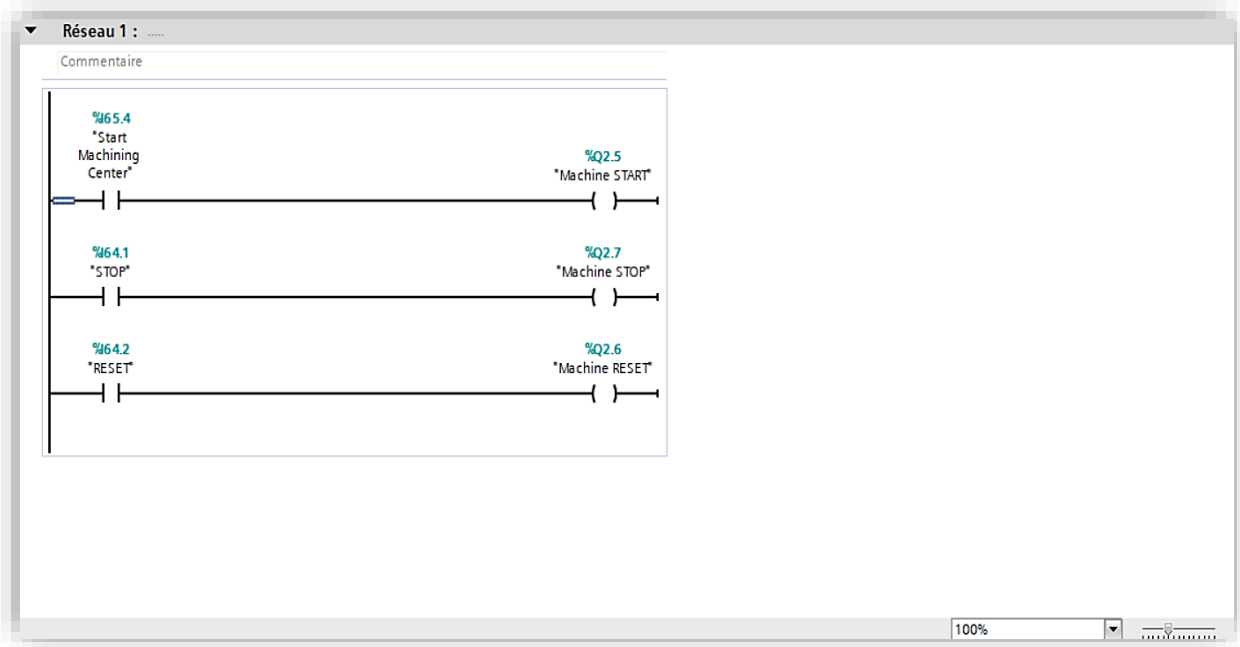


Figure III.42 : Commande de démarrage, arrêt et réinitialisation du centre d'usinage

Description :

- L'opérateur peut démarrer, arrêter ou réinitialiser la machine.
- Une fois la pièce détectée, le robot démarre automatiquement.
- Le système assure une synchronisation entre l'arrivée de la pièce et l'action du robot.

Partie 09 :

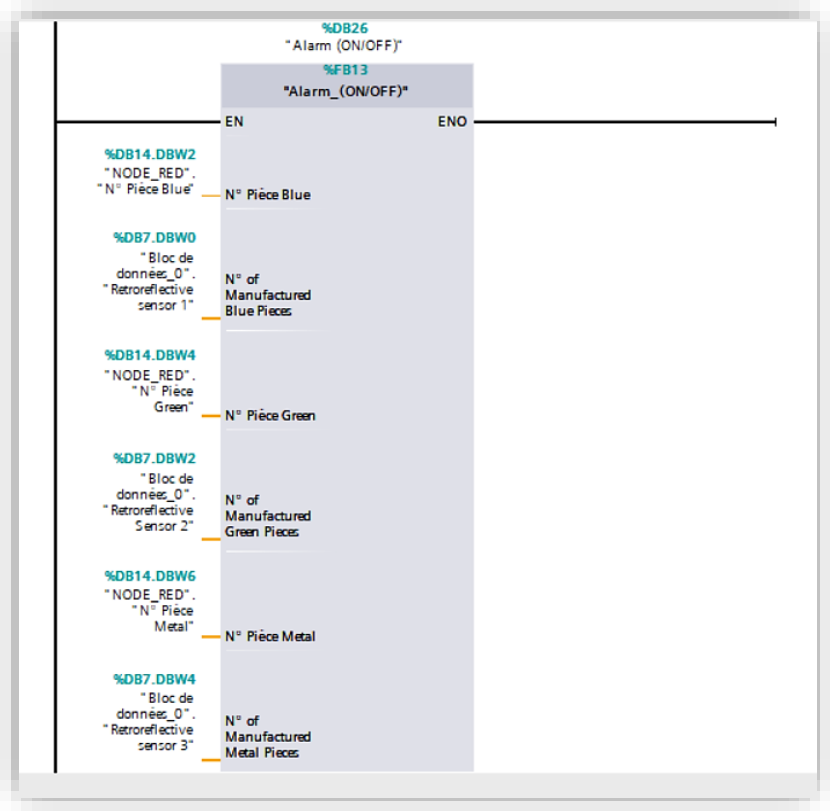


Figure III.43 : Bloc de gestion des alarmes de production

- **Bloc [Alarm (ON/OFF)] (FB13):**

  - ***Réseau 01 :***

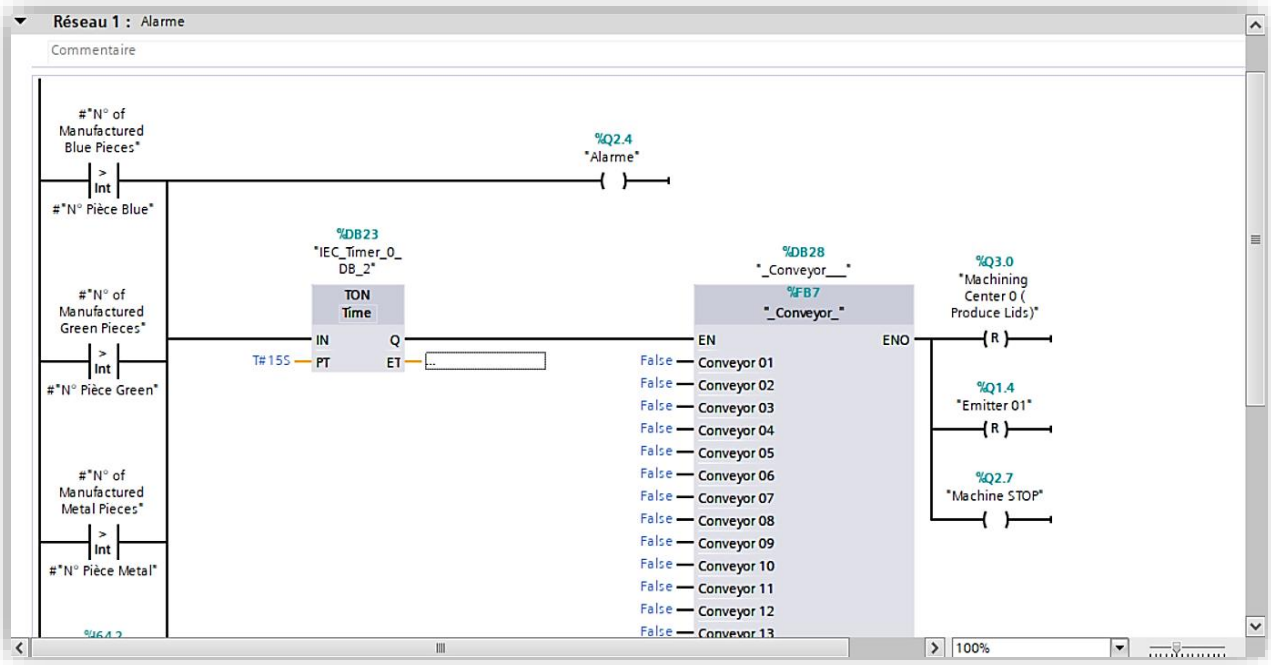


Figure III.44 : Gestion des alarmes de production

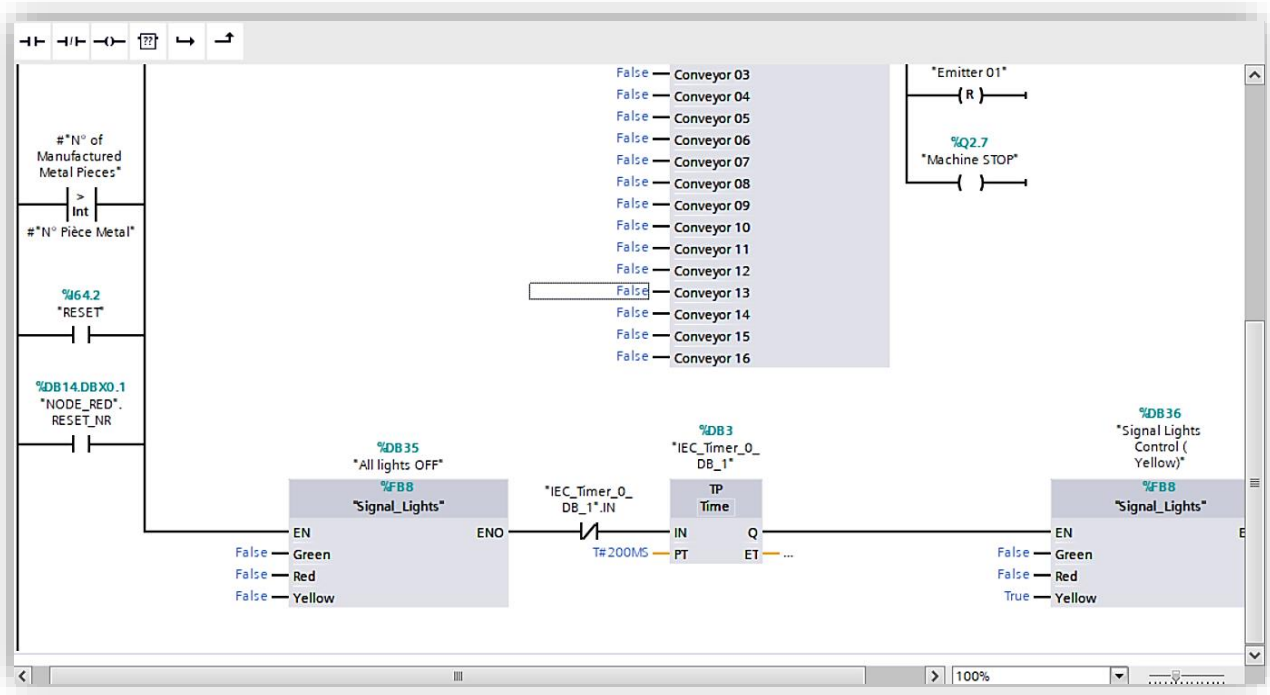


Figure III.45 : Gestion des alarmes de production (la suite)

Description :

- En cas de production excédant la demande⟶ un système d'alarme se déclenche.
- Après un délai de 15 secondes → la machine et les convoyeurs s'arrêtent automatiquement.
- Simultanément, un signal lumineux jaune clignotant est activé.
- Ce dispositif assure la prévention de toute surproduction.

III.7 Simulation sous FACTORY I/O

Présentation de la station de triage sur la chaîne de production dans Factory I/O, ainsi que la configuration de la communication entre TIA Portal et Factory I/O.

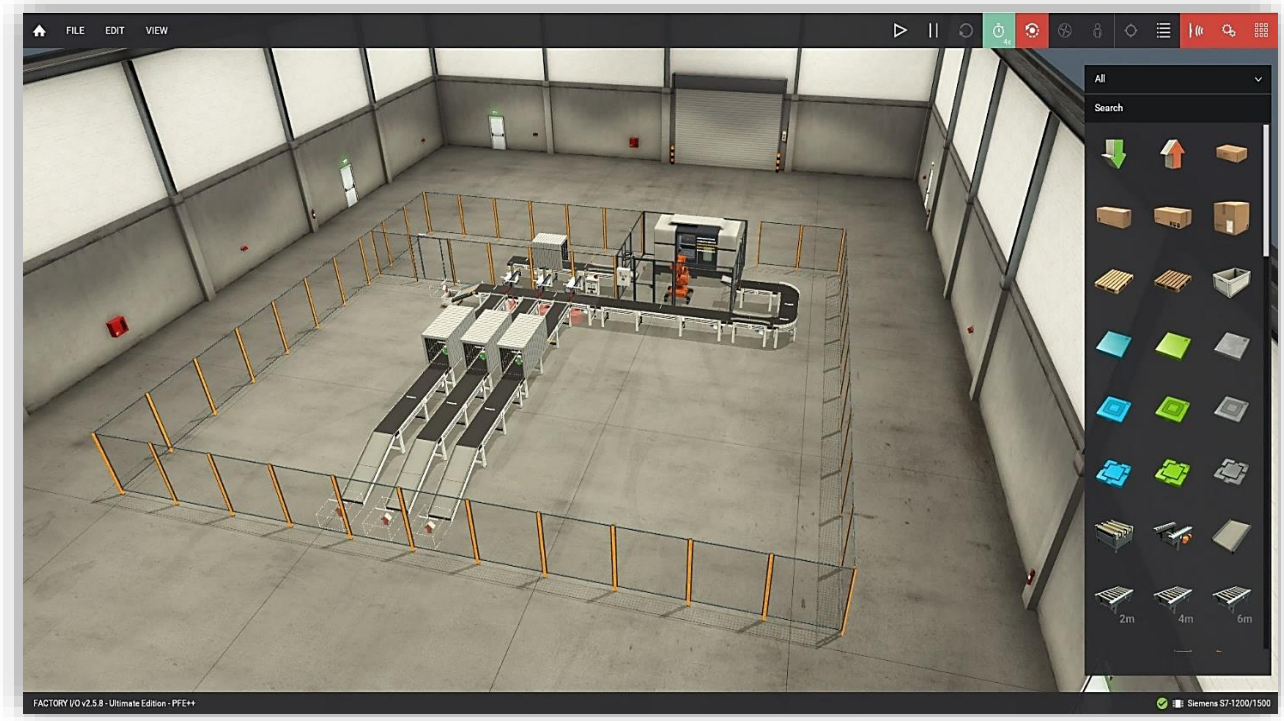


Figure III.46 : Modèle 3D de la station de tri sous Factory I/O

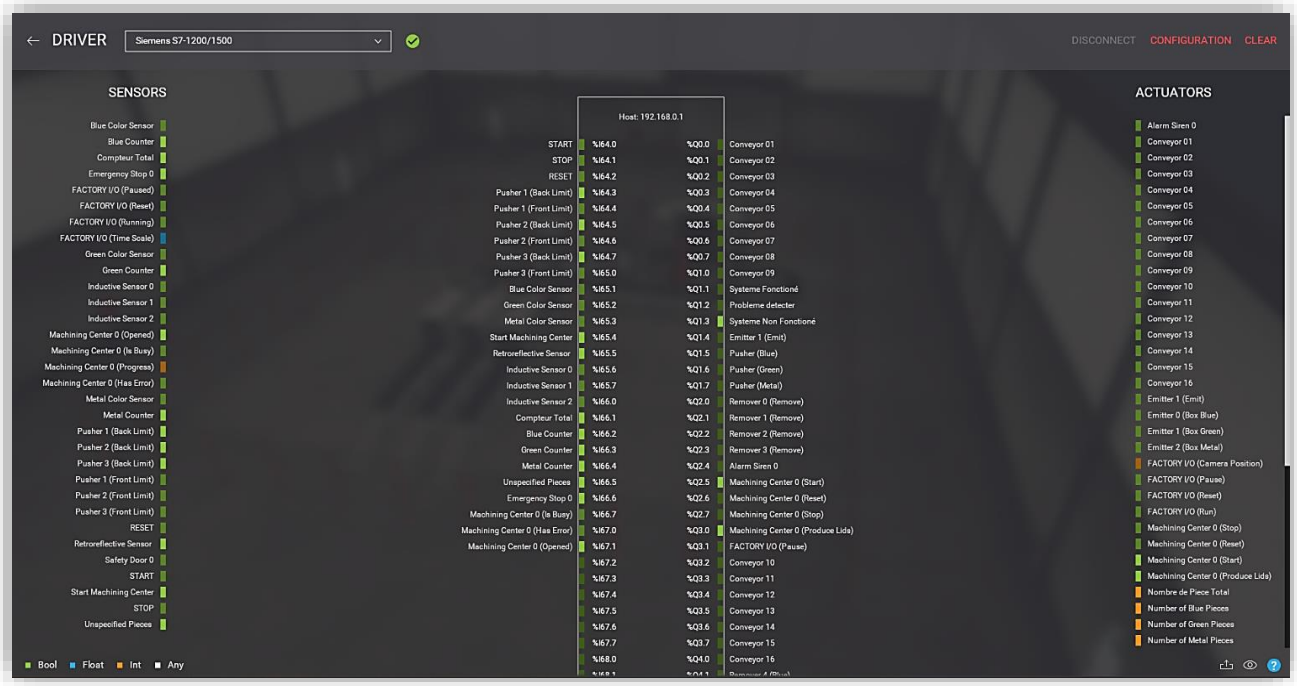


Figure III.47 : Configuration du Driver Siemens S7-1200/1500 dans Factory I/O

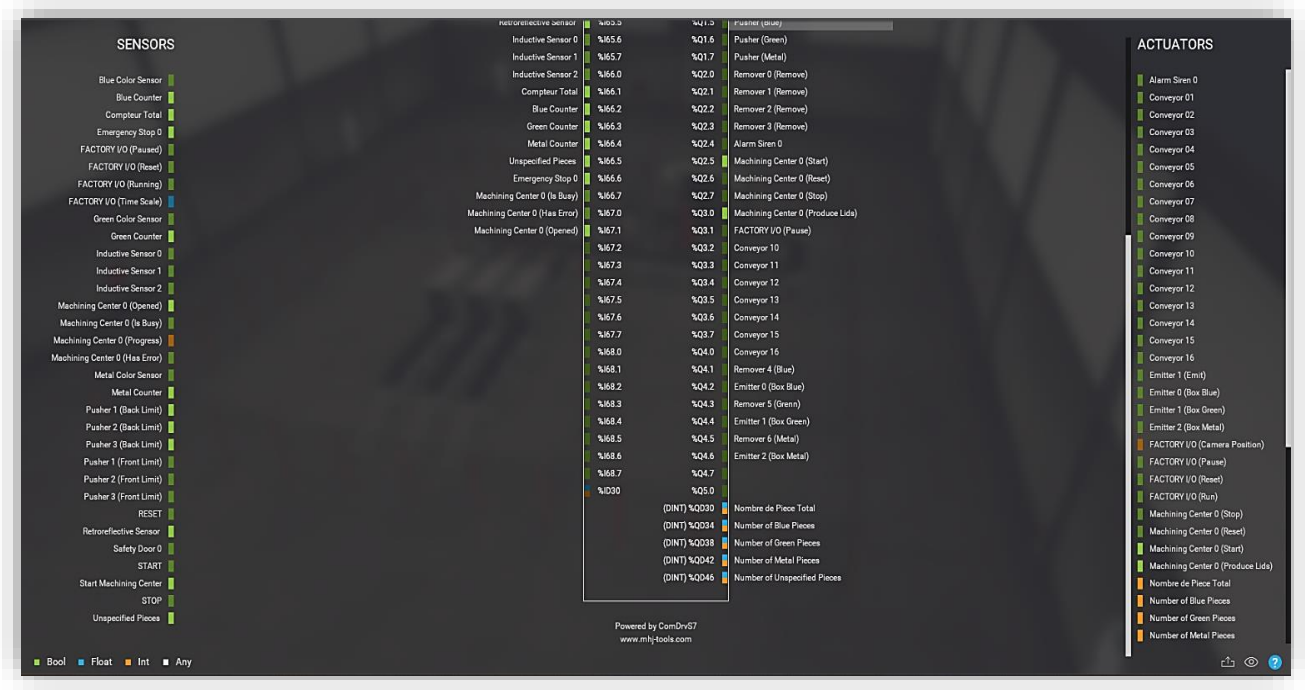


Figure III.48 : Configuration du Driver Siemens S7-1200/1500 dans Factory I/O (la suite)

a. Structure de panneau de commande :

Le panneau de contrôle se compose de plusieurs boutons différents avec plusieurs afficheurs représentés dans le (Tableau III.1) le (Figure III.44) représentent l'image de la structure du panneau de commande.

Numéro d'élément	Variables	Entrée / Sortie	Description	Type
0	I66.6	Entrée	Bouton d'urgence	Bouton poussoir d'arrêt d'urgence
1	I64.1	Entrée	Bouton Stop	Bouton poussoir
2	I64.2	Entrée	Bouton Reset	Bouton poussoir
3	I64.0	Entrée	Bouton Start	Bouton poussoir
4	QD34	Sortie	Le nombre de pièces bleues	Afficheur digital
5	QD38	Sortie	Le nombre de pièces vertes	Afficheur digital

6	QD42	Sortie	Le nombre de pièces métalliques	Afficheur digital
7	QD46	Sortie	Nombre de pièces non spécifiées	Afficheur digital
8	Q2.6	Sortie	Centre d'usinage 0 - Reset	Bouton poussoir
9	Q2.5	Sortie	Centre d'usinage 0 - Start	Bouton poussoir
10	Q2.7	Sortie	Centre d'usinage 0 - Stop	Bouton poussoir
11	QD30	Sortie	Nombre total de pièces	Afficheur digital

Tableau III.1: Structure de panneau de commande

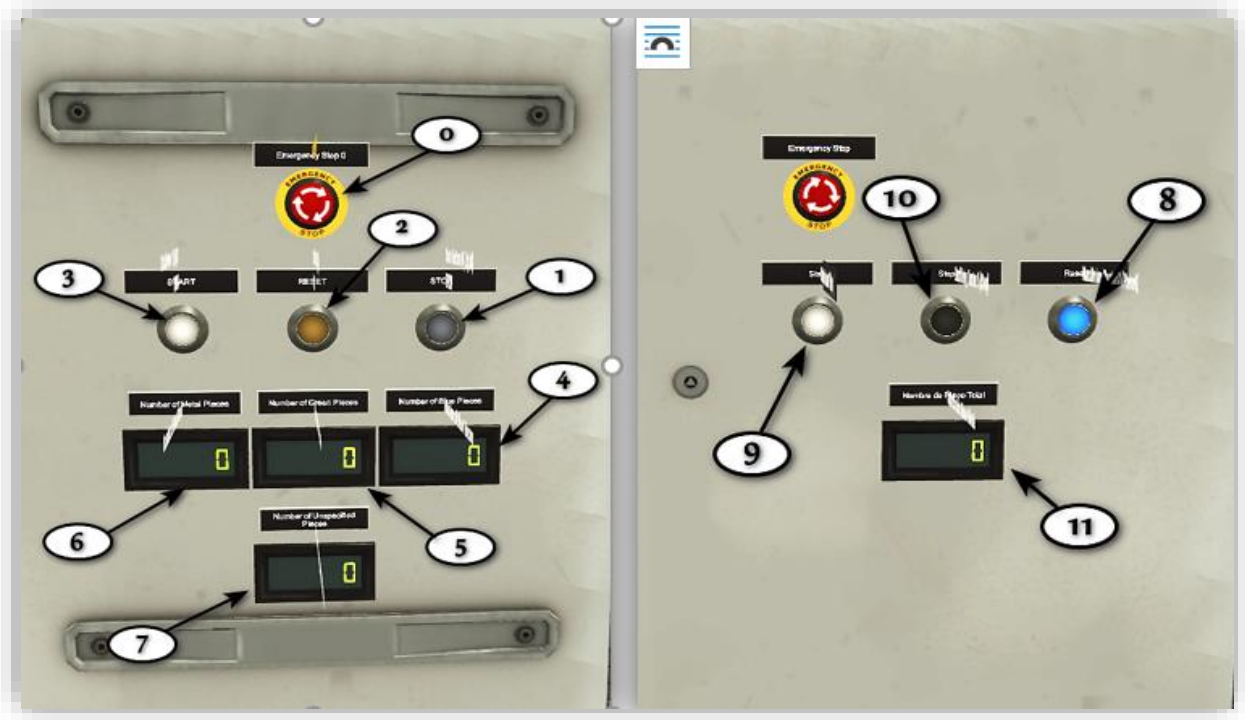


Figure III.49 : Panneau de commande

b. Structure de la station de tri :

1. Capteurs :

La station de tri est équipée de 13 capteurs, présentés dans le tableau III.2. Les figures III.45, III.46 et III.47 illustrent l'implantation des capteurs au sein de la station de tri.

Capteurs	Variables	Entrée / Sortie	Description	Type
C0	I66.1	Entrée	Compteur total des Pièces	Capteur rétro réfléchissant
C1	I65.4	Entrée	Démarrer le centre d'usinage	Capteur rétro réfléchissant
C2	I65.5	Entrée	Capteur d'autorisation d'émission d'une nouvelle pièce	Capteur rétro réfléchissant
C3	I66.0	Entrée	Détection des pièces métalliques	Capteur inductif
C4	I65.1	Entrée	Capteur de couleur bleue	Capteur de vision
C5	I65.7	Entrée	Détection des pièces métalliques	Capteur inductif
C6	I65.2	Entrée	Capteur de couleur verte	Capteur de vision
C7	I65.6	Entrée	Détection des pièces métalliques	Capteur inductif
C8	I65.3	Entrée	Capteur de couleur métallique	Capteur de vision
C9	I66.5	Entrée	Compteur des pièces non spécifiées	Capteur rétro réfléchissant
C10	I66.4	Entrée	Compteur des pièces métalliques	Capteur rétro réfléchissant
C11	I66.3	Entrée	Compteur des pièces vertes	Capteur rétro réfléchissant
C12	I66.2	Entrée	Compteur des pièces bleues	Capteur rétro réfléchissant

Tableau III.2: Les capteurs de la station de tri

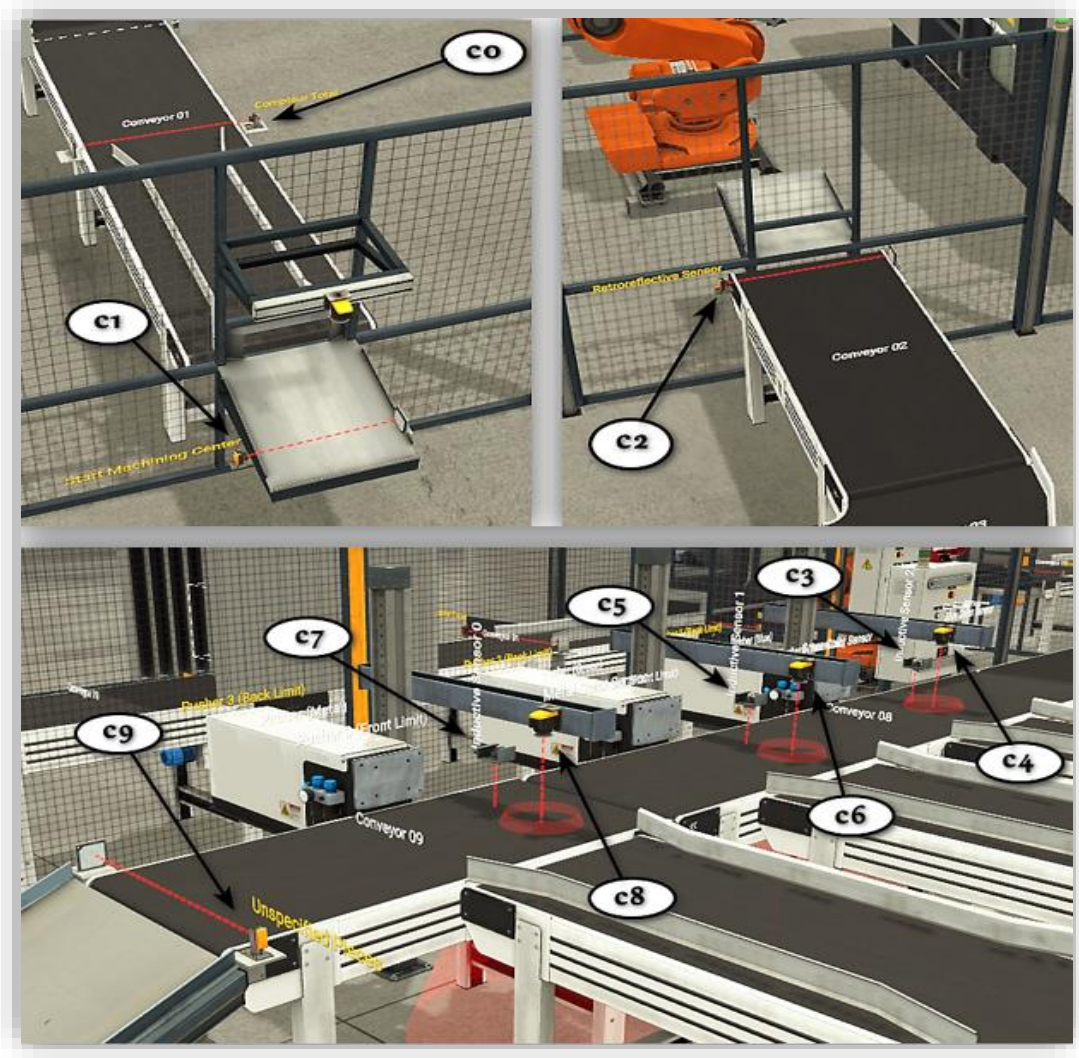


Figure III.50 : Position des capteurs dans la station de tri

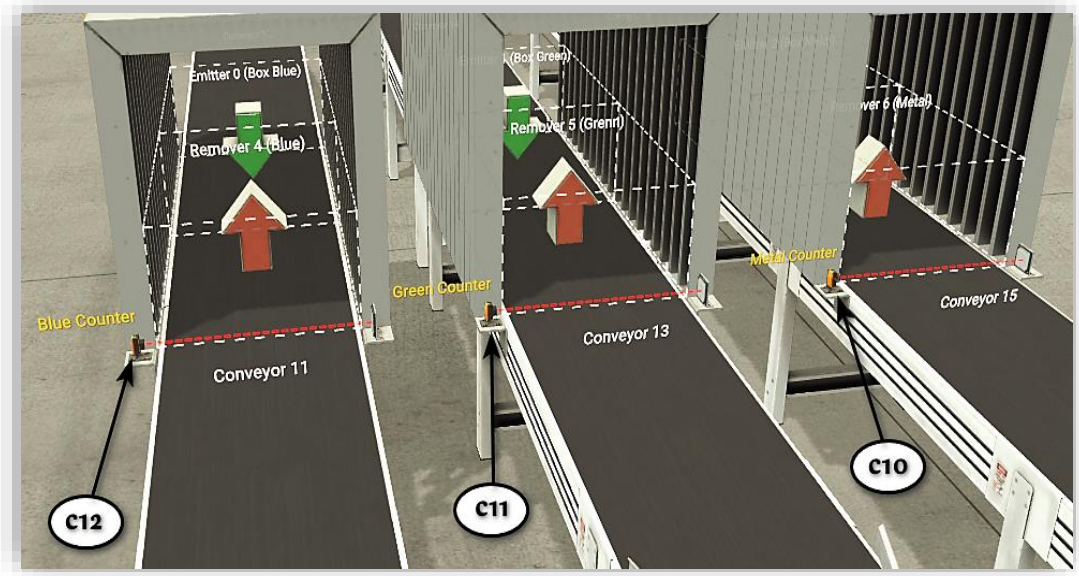


Figure III.51 : Position des capteurs dans la station de tri (la suite)

2. Actionneurs :

Concernant les actionneurs, le système comporte 19 actionneurs comme le montre le tableau III.3. Les figures III.48 a III.50 représentent les photos les actionneurs.

Actionneurs	Variables	Entrée / Sortie	Description	Type
A0	Q3.2	Sortie	Convoyeur n°0 de pièces	Moteur
A1	Q0.0	Sortie	Convoyeur n°01 de Pièces	Moteur
A2	Q0.1	Sortie	Convoyeur n°02 de pièces	Moteur
A3	Q0.2	Sortie	Convoyeur n°03 de pièces	Moteur
A4	Q0.3	Sortie	Convoyeur n°04 de pièces	Moteur
A5	Q0.4	Sortie	Convoyeur n°05 de pièces	Moteur
A6	Q0.5	Sortie	Convoyeur n°06 de pièces	Moteur
A7	Q0.6	Sortie	Convoyeur n°07 de pièces	Moteur
A8	Q0.7	Sortie	Convoyeur n°08 de pièces	Moteur
A9	Q1.0	Sortie	Convoyeur n°09 de pièces	Moteur
A10	Q3.3	Sortie	Convoyeur n°10 de pièces	Moteur
A11	Q3.5	Sortie	Convoyeur n°11 de pièces	Moteur
A12	Q3.7	Sortie	Convoyeur n°12 de pièces	Moteur
A13	Q3.4	Sortie	Convoyeur n°13 de cartons	Moteur
A14	Q3.6	Sortie	Convoyeur n°14 de cartons	Moteur
A15	Q4.0	Sortie	Convoyeur n°15 de cartons	Moteur

A16	Q1.7	Sortie	Vérin pousseur n°01 – Pièces bleues	Vérin simple effet
A17	Q1.6	Sortie	Vérin pousseur n°02 – Pièces vertes	Vérin simple effet
A18	Q1.5	Sortie	Vérin pousseur n°03 – Pièces métalliques	Vérin simple effet

Tableau III.3: les actionneurs de la station de tri

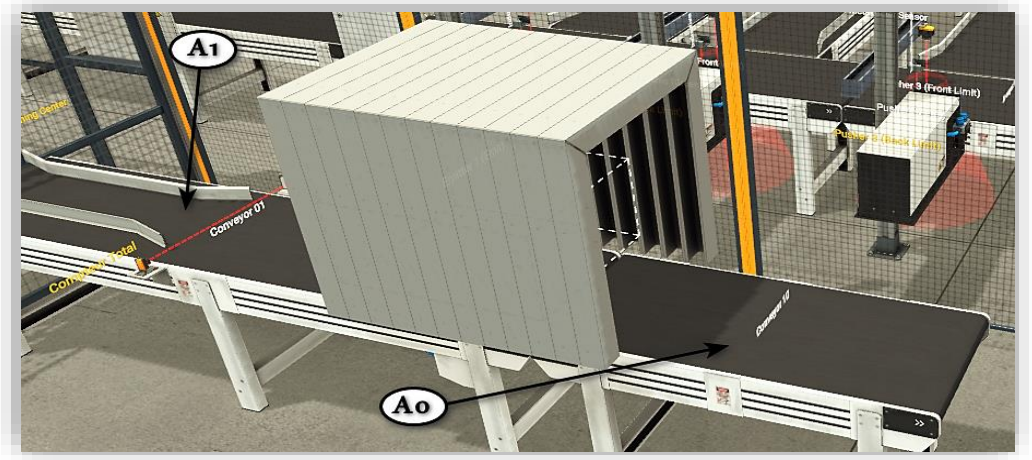


Figure III.52 : Positionnement des actionneurs dans le système

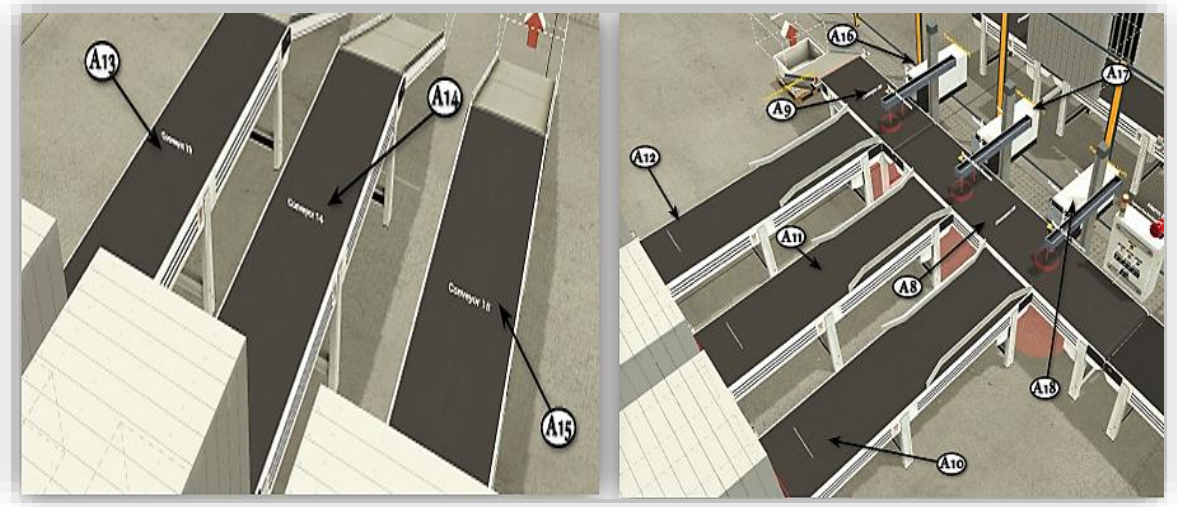


Figure III.53 : Positionnement des actionneurs dans le système (la suite)

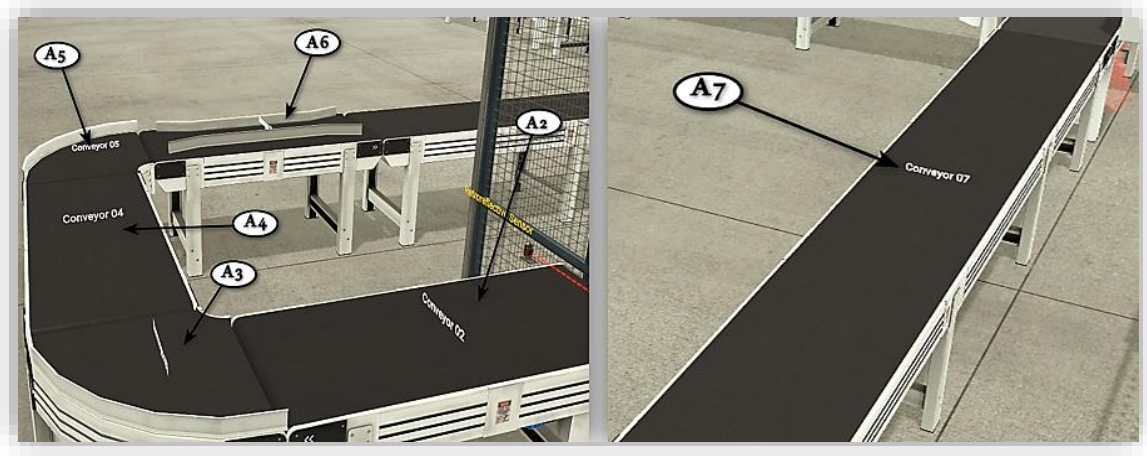


Figure III.54 : Positionnement des actionneurs dans le système (la suite)

Figure III.55 : Fonctionnement du système de tri selon la couleur et la nature de la pièce

III.8 Commande et visualisation des lots via NODE-RED

- **Sélection 1 :**

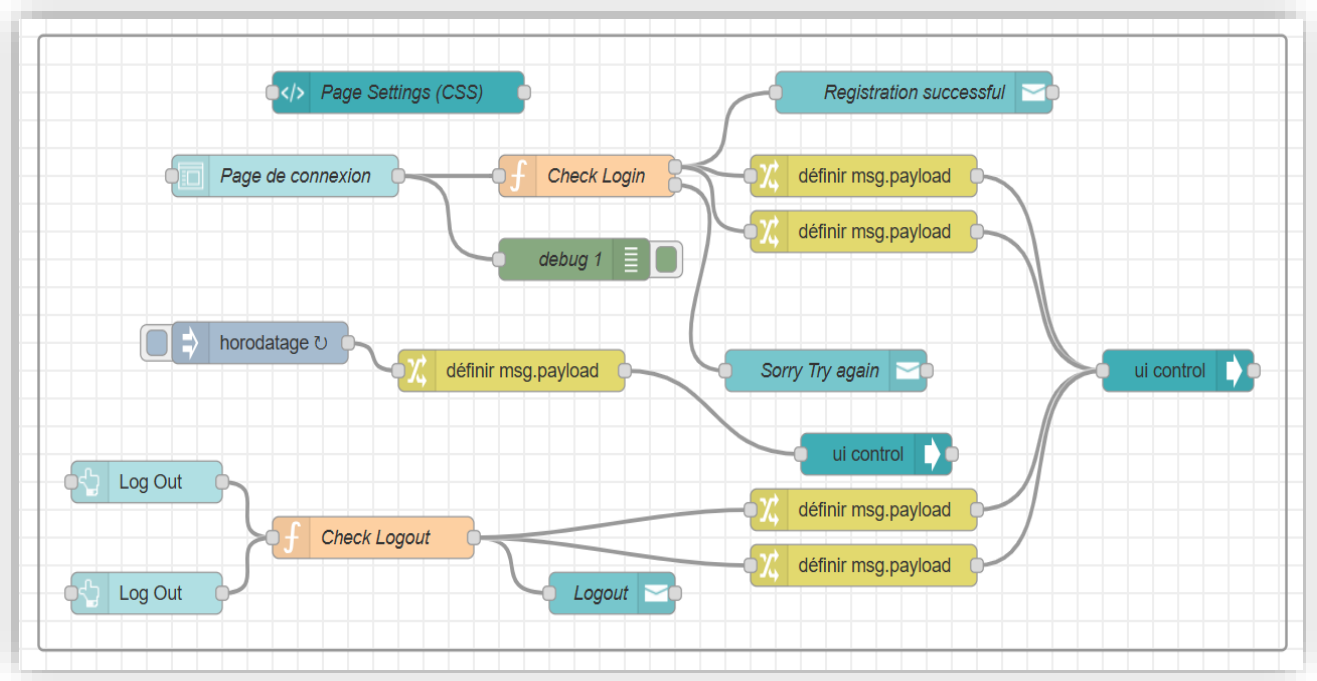


Figure III.56 : Gestion de l'authentification sous Node-RED

Description :

- Ce flow Node-RED permet la gestion d'authentification via une page de connexion contenant l'adresse (username) et le mot de passe.
- Les données saisies sont envoyées vers le nœud Check Login qui vérifie la validité des informations.
- En cas d'identifiants corrects, un message de succès est généré et le nœud ui control redirige l'utilisateur vers l'interface principale.
- En cas d'erreur, un message « Sorry Try again » s'affiche et l'utilisateur reste sur la page de connexion.
- Les nœuds définir msg.payload servent à préparer et transmettre les messages nécessaires au changement de page ou à l'affichage des notifications .
- Le bouton Log Out envoie une requête vers le nœud Check Logout qui ferme la session et redirige automatiquement l'utilisateur vers la page de connexion.
- Ce système assure ainsi un contrôle d'accès simple et sécurisé à l'interface de supervision.

- **Sélection 2 :**

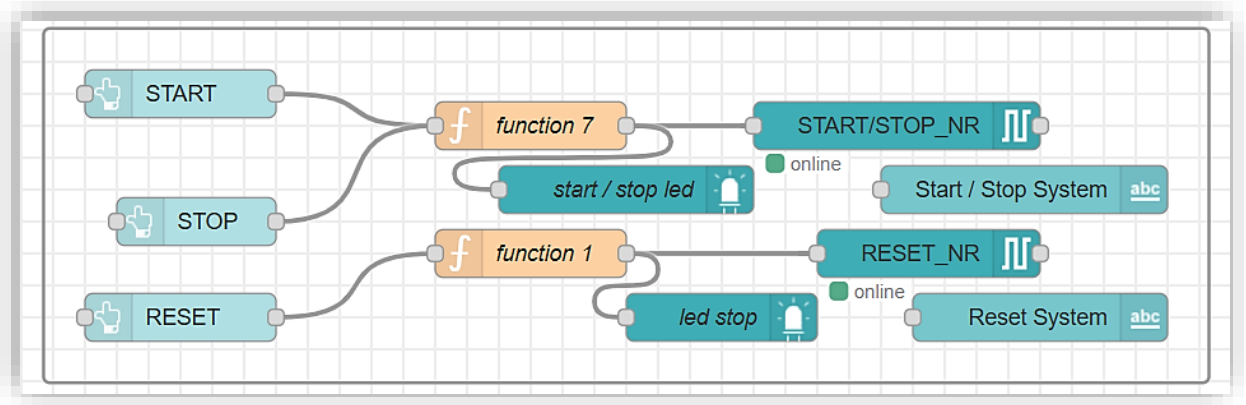


Figure III.57 : Interface de pilotage du système (Start – Stop – Reset)

Description :

- Ce flow permet le contrôle de la station de tri à distance via les boutons START, STOP et RESET dans Node-RED.
- Lorsque l'utilisateur appuie sur START, une commande est envoyée vers la variable START/STOP_NR afin de démarrer la station (convoyeur, robot et actionneurs), et une LED d'indication s'allume pour signaler que le système est en fonctionnement.
- En appuyant sur STOP, une commande d'arrêt est transmise au PLC, ce qui provoque l'arrêt du convoyeur, du robot et des pushers, avec extinction du voyant de marche.
- Le bouton RESET envoie un signal vers RESET_NR pour réinitialiser le système et remettre les variables à l'état initial.
- Les nœuds function assurent le traitement logique des commandes avant leur envoi au PLC.
- Les nœuds start/stop led et led stop permettent d'afficher visuellement l'état de la station (marche ou arrêt) sur l'interface.
- Les variables START/STOP_NR et RESET_NR sont connectées au PLC, garantissant ainsi un contrôle réel et sécurisé de la station de tri.

- **Sélection 3 :**

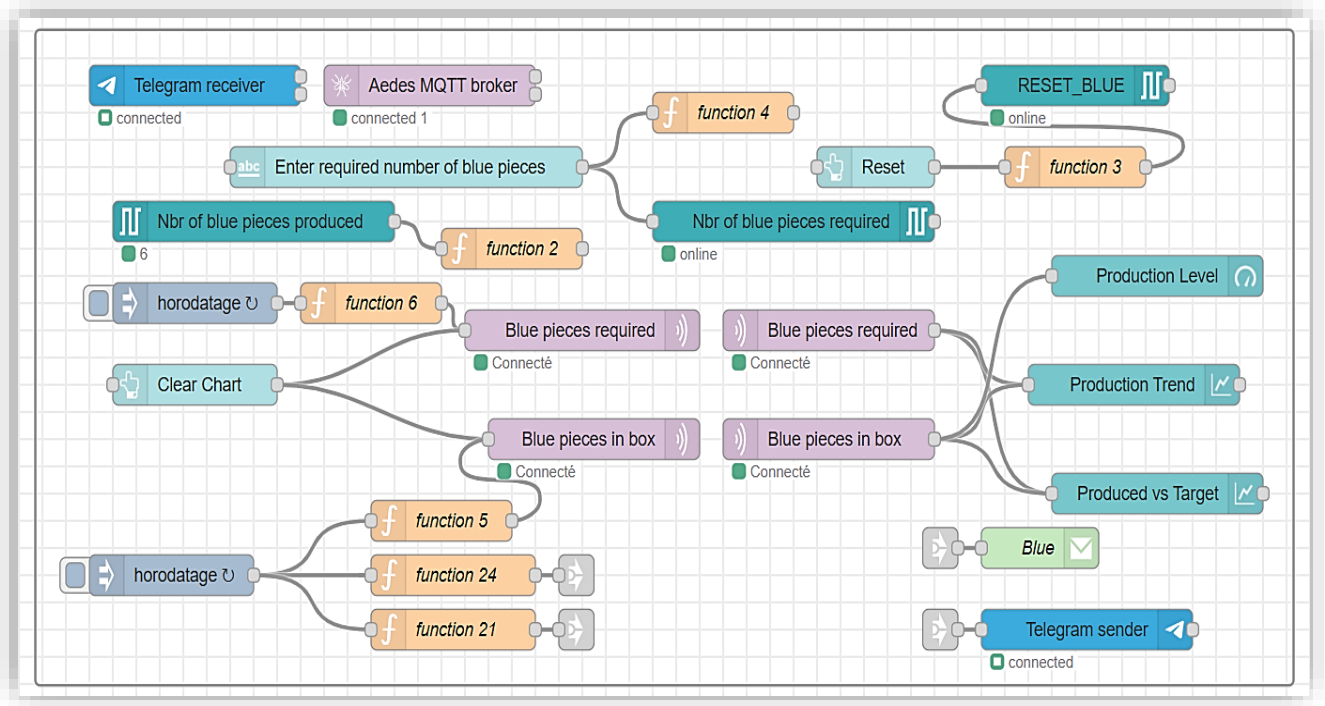


Figure III.58 : Gestion de la production et suivi des pièces bleues

Description :

- Ce flow permet la gestion et le suivi de la production des pièces bleues via Node-RED.
- L'utilisateur peut entrer le nombre de pièces bleues requises à travers le champ "Enter required number of blue pieces", qui est ensuite enregistrée dans la variable Nbr of blue pieces required.
- Le nombre réel de pièces produites est récupéré du PLC via Nbr of blue pieces produced.
- Les nœuds fonction (fonction 2, 4, 6…) assurent le traitement logique des données (comparaison, calcul, mise à jour).
- Le bouton Reset permet de remettre à zéro le compteur bleu via la variable RESET_BLUE.
- Les données sont envoyées vers les widgets d'affichage.

    - Production Level (niveau de production).
    - Production Trend (évolution dans le temps).
    - Produced vs Target (comparaison).

- Permettent la transmission et l'actualisation des données en temps réel.
- Le nœud Telegram sender permet d'envoyer des notifications en cas d'atteinte de l'objectif ou d'événement spécifique.
- Ainsi, ce système assure un suivi en temps réel de la production des pièces bleues avec contrôle, visualisation et notification automatique.

- **Sélection 4 :**

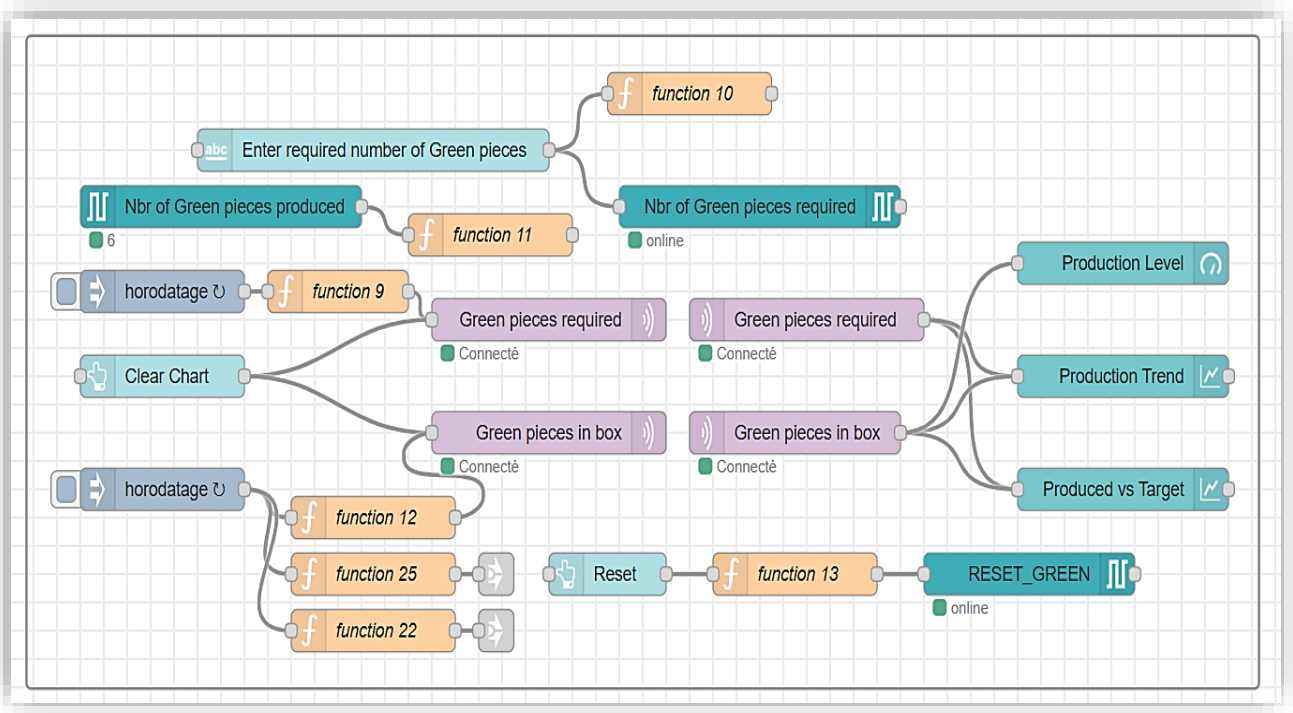


Figure III.59 : Gestion de la production et suivi des pièces vertes

Description :

- Ce flow Node-RED est dédié à la gestion et au suivi de la production des pièces vertes.
- L'utilisateur saisit la quantité demandée via « Enter required number of Green pieces », qui est ensuite enregistrée dans la variable Nbr of Green pieces required.
- Le nombre réel produit est récupéré automatiquement du PLC à travers Nbr of Green pieces produced.
- Les nœuds fonction (9, 10, 11, 12, 25, 22…) assurent le traitement logique des données (comparaison, calcul, mise à jour).
- Les variables Green pieces required et Green pieces in box permettent l'actualisation et la transmission des données en temps réel.

- Les widgets Production Level, Production Trend et Produced vs Target affichent le niveau de production, l'évolution dans le temps et la comparaison entre production réelle et objectif.
- Le bouton Reset active la variable RESET_GREEN pour remettre à zéro les compteurs des pièces vertes.
- Ce flow garantit ainsi un contrôle précis, une supervision en temps réel et une gestion efficace de la production des pièces vertes.

- **Sélection 5 :**

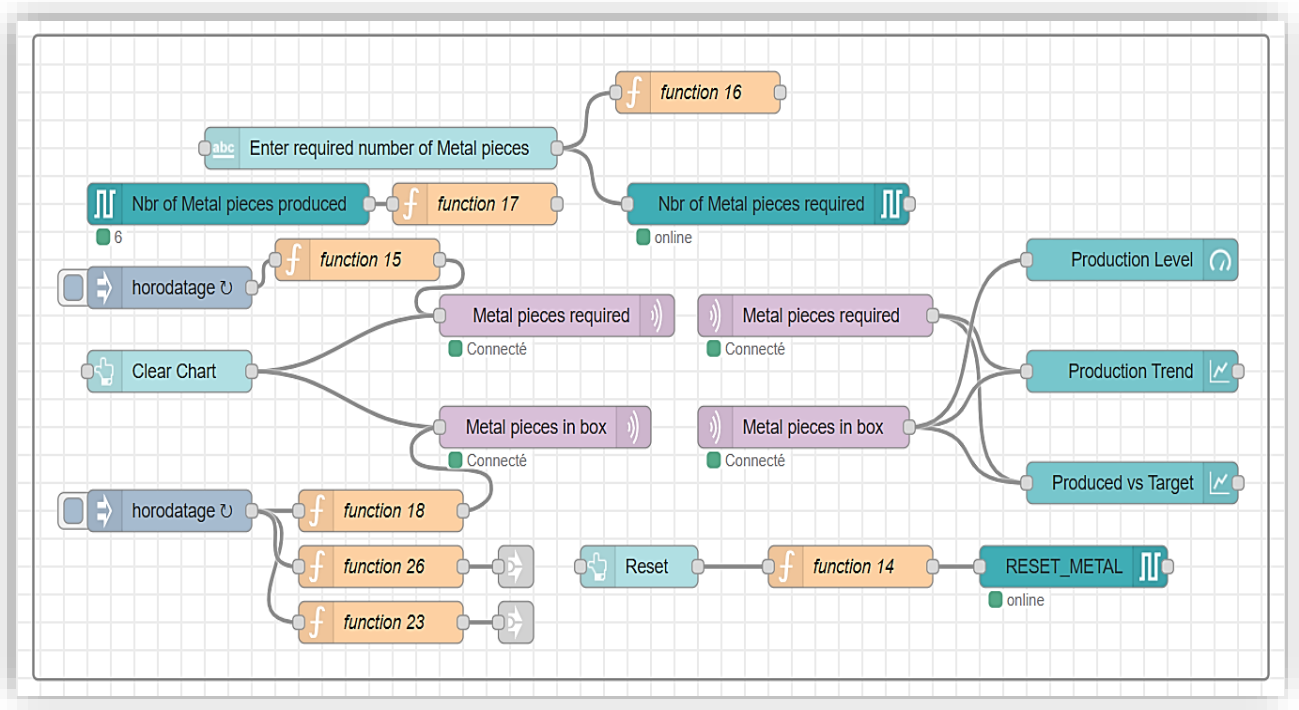


Figure III.60 : Gestion de la production et suivi des pièces métalliques

Description :

- Ce flow Node-RED est dédié au suivi et au contrôle de la production des pièces métalliques.
- L'utilisateur saisit la quantité demandée via « Enter required number of Metal pieces », qui est ensuite enregistrée dans la variable Nbr of Metal pieces required.
- Le nombre réel de pièces produites est récupéré automatiquement depuis le PLC à travers Nbr of Metal pieces produced.
- Les nœuds fonction (15, 16, 17, 18, 26, 23…) assurent le traitement logique des données, les calculs et la comparaison entre la production réelle et l'objectif fixé.

- Les variables Metal pieces required et Metal pieces in box permettent la transmission et la mise à jour des données en temps réel.
- Les widgets Production Level, Production Trend et Produced vs Target affichent respectivement le niveau de production, l'évolution dans le temps et la comparaison entre production réalisée et production demandée.
- Le bouton Reset active la variable RESET_METAL pour remettre à zéro le compteur des pièces métalliques.
- Ce flow garantit ainsi une supervision en temps réel, un contrôle précis des objectifs et une gestion efficace de la production des pièces métalliques.

- **Sélection 6 :**

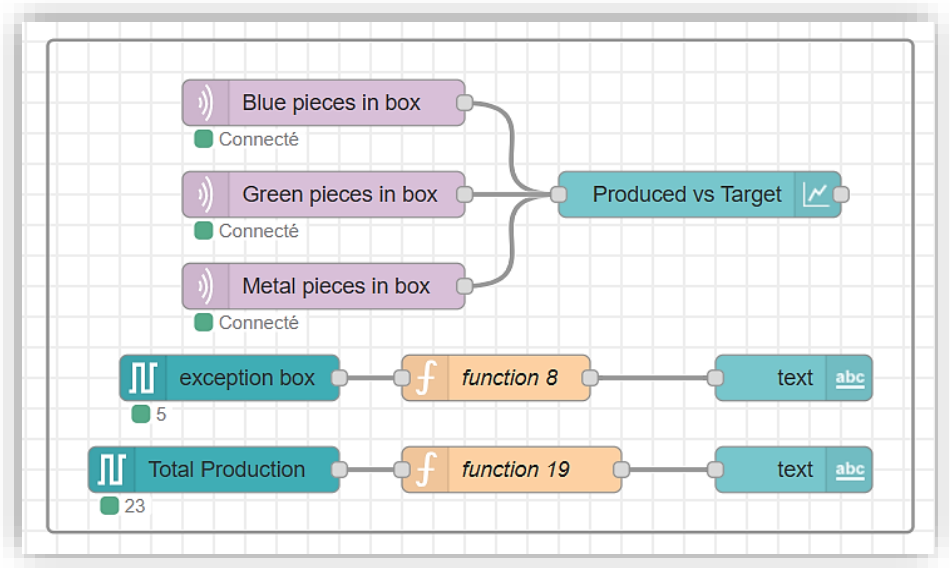


Figure III.61 : Analyse comparative entre la production réalisée et les objectifs fixés

Description :

- Les variables Blue pieces in box, Green pieces in box et Metal pieces in box représentent le nombre total de pièces triées pour chaque catégorie.
- Ces trois valeurs sont regroupées et affichées ensemble dans un seul graphique (Produced vs Target) afin de visualiser l'évolution globale de la production.
- La variable Total Production correspond au nombre total de pièces triées (somme des pièces bleues, vertes, métalliques et éventuellement non spécifiées).
- La variable exception box représente le nombre de pièces exceptionnelles ou non spécifiées détectées par le système.

- Les fonctions intermédiaires (fonction 8, fonction 19) assurent le traitement, le calcul et la mise en forme des données avant leur affichage.
- Les widgets texte permettent d'afficher clairement le total général des pièces ainsi que le nombre de pièces exceptionnelles.
- Ce système permet d'avoir une vue globale et en temps réel sur les performances de la station de tri et sur la répartition des pièces.

- **Sélection 7 + 8 + 9 :**

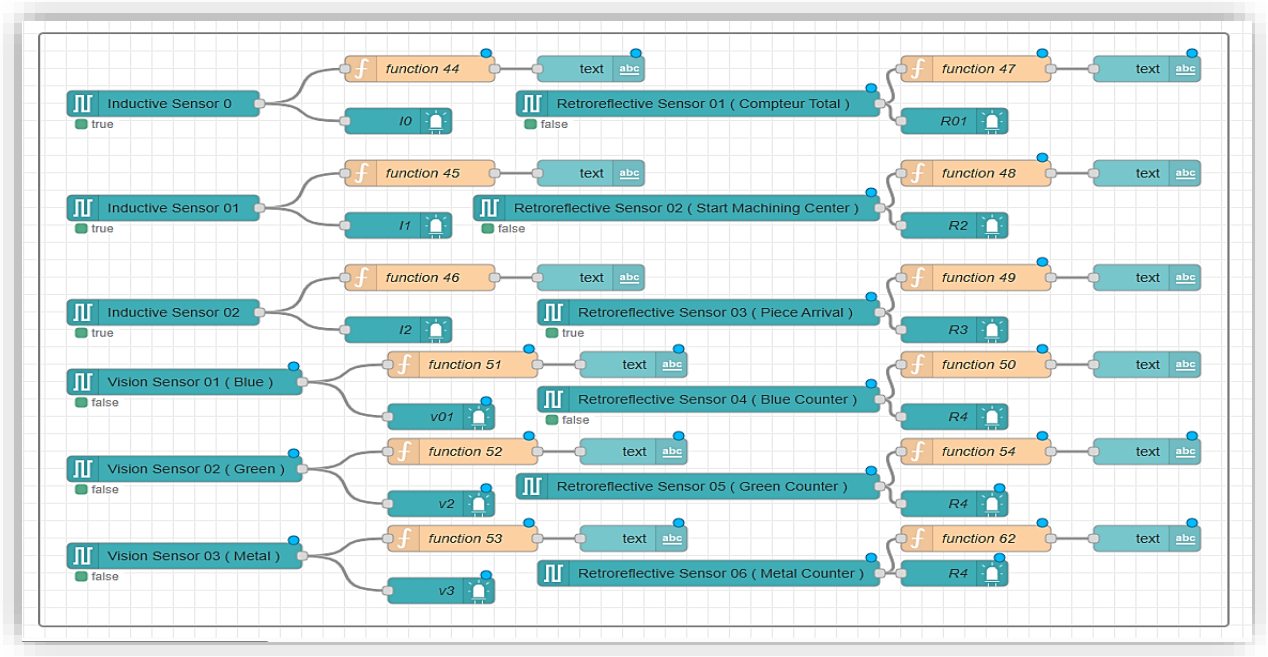


Figure III.62 : Système global de supervision des équipements et capteurs de la station de tri

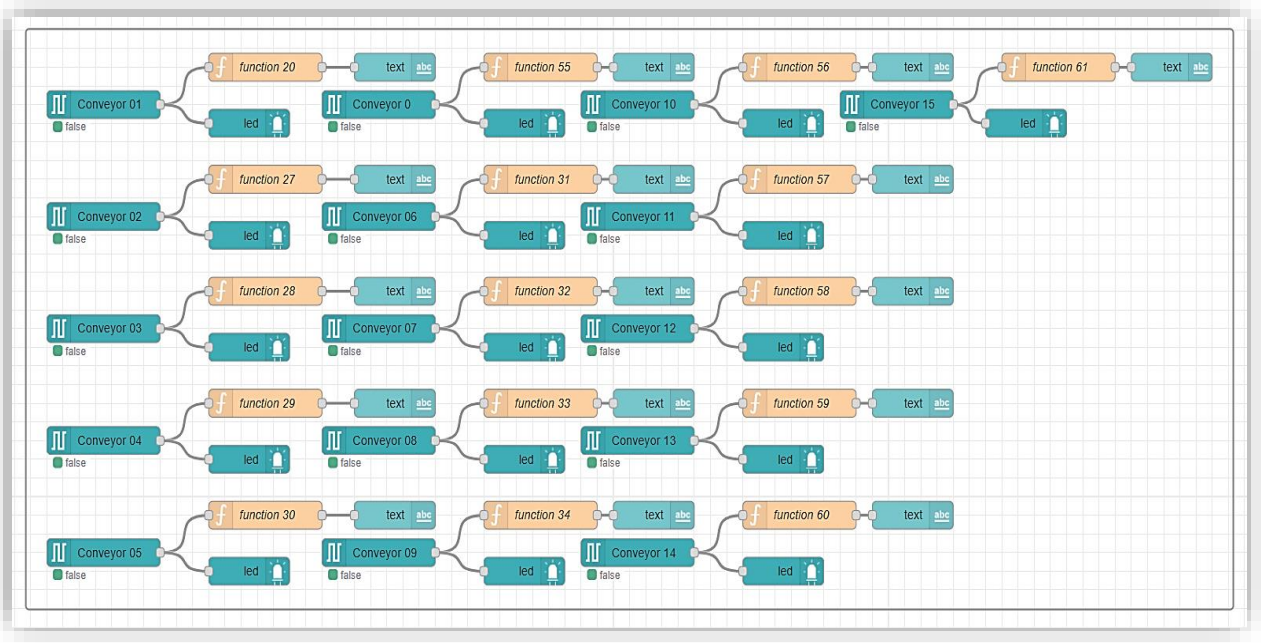


Figure III.63 : Système global de supervision des équipements et capteurs de la station de tri(la suite)

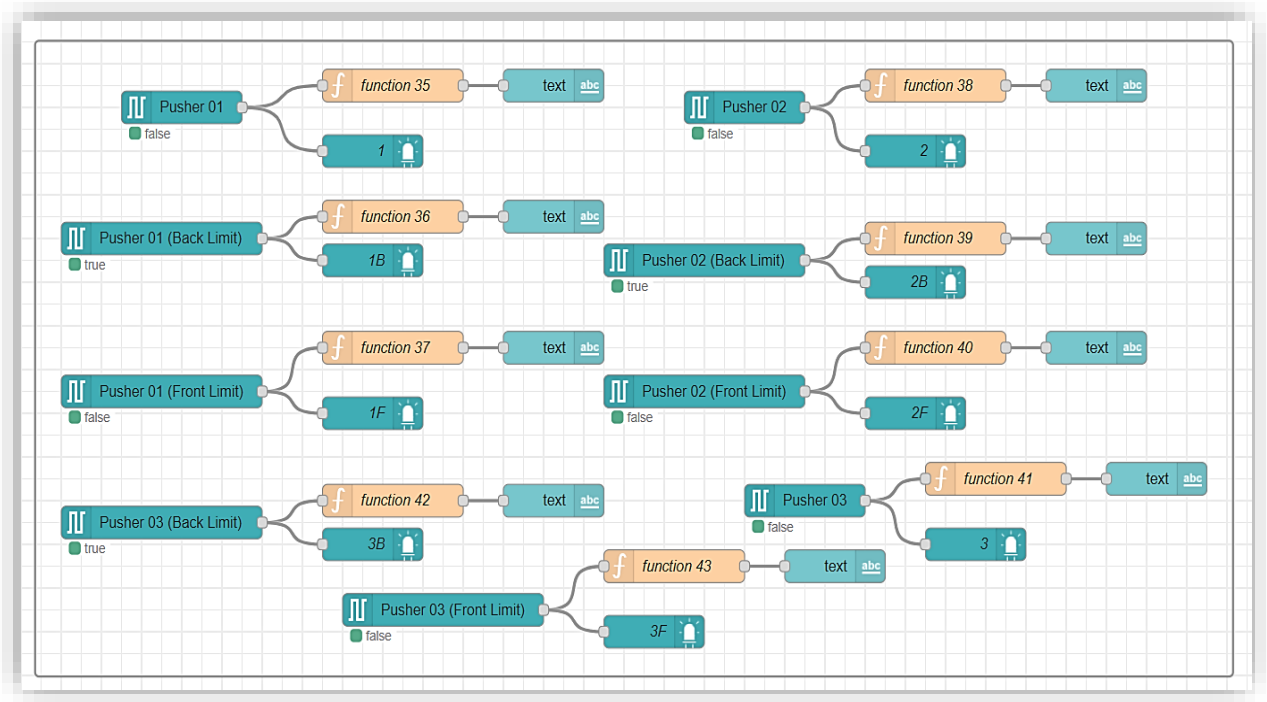


Figure III.64 : Système global de supervision des équipements et capteurs de la station de tri (la suite)

Description :

- Ce Dashboard assure la supervision complète de la station de tri en affichant en temps réel l'état des convoyeurs, des pousseurs et des capteurs.
- Chaque Convoyeur (01 à 15) est associé à un indicateur LED qui change d'état (vert = en marche, gris/rouge = arrêté) afin de visualiser instantanément son fonctionnement.
- Chaque Pusher (01, 02, 03) possède également une LED d'état général ainsi que deux voyants supplémentaires pour les fins de course avant (Front Limit) et arrière (Back Limit), permettant de vérifier la position exacte du vérin, en cas d'absence de signal de fin de course ou d'incohérence entre la commande et la position détectée, une anomalie ou une panne du vérin peut être identifiée.
- Les capteurs inductifs (I0, I1, I2) détectent la présence des pièces métalliques et leurs LED indiquent l'activation en temps réel.
- Les capteurs rétro-réflectifs (R1 à R6) détectent le passage des pièces sur les convoyeurs et leurs LED confirment la détection.
- Les capteurs de vision (01, 02, 03) identifient la couleur ou le type des pièces, et leurs LED indiquent l'activation en temps réel.

- Ce système permet d'avoir une visualisation centralisée, rapide et précise de toute la station de tri sans intervenir directement sur TIA Portal.
- L'ensemble garantit un suivi en temps réel du fonctionnement mécanique et du processus de tri, facilitant le diagnostic en cas de défaut ou d'arrêt.

- **Interface NODE RED :**

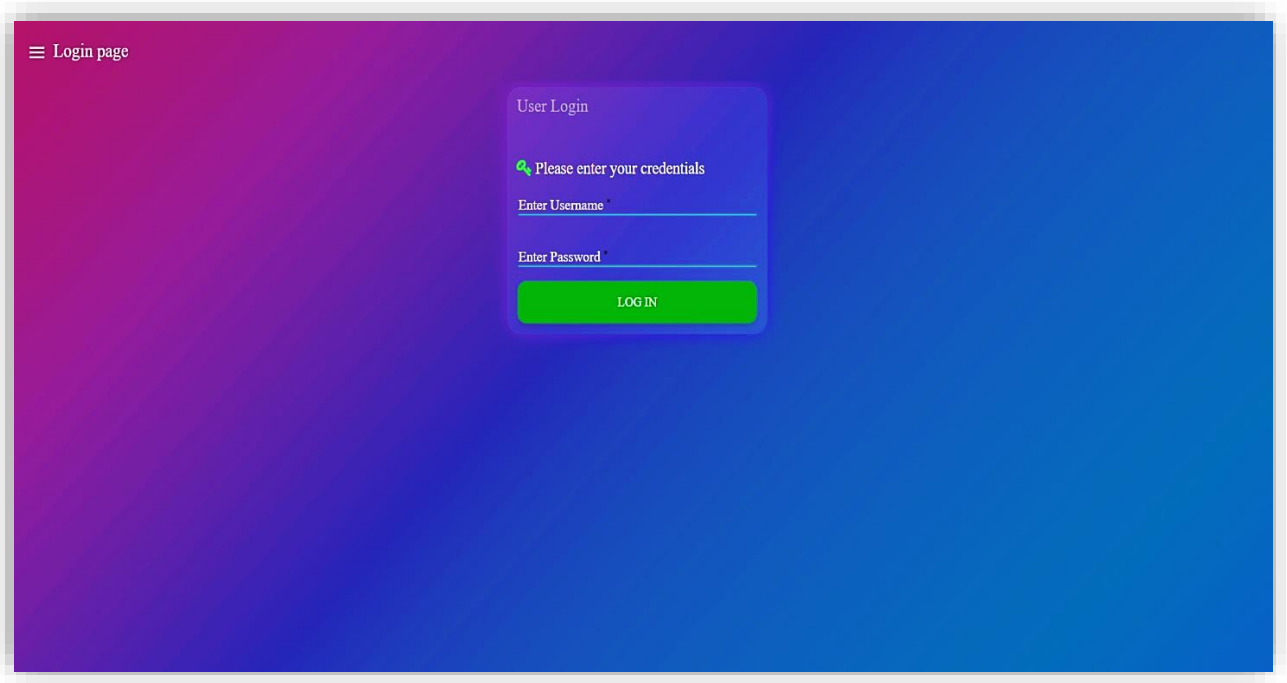


Figure III.65 : Interface d'authentification du système de supervision

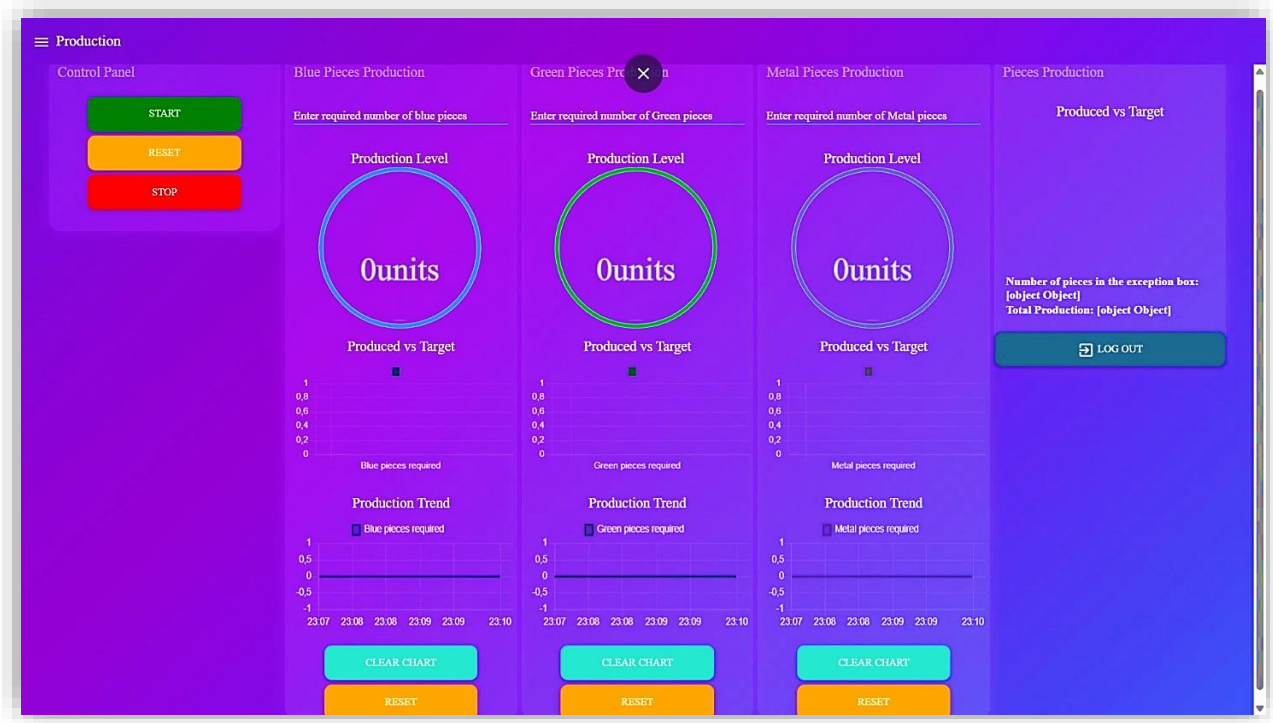


Figure III.66 : Tableau de bord de production et de contrôle du système

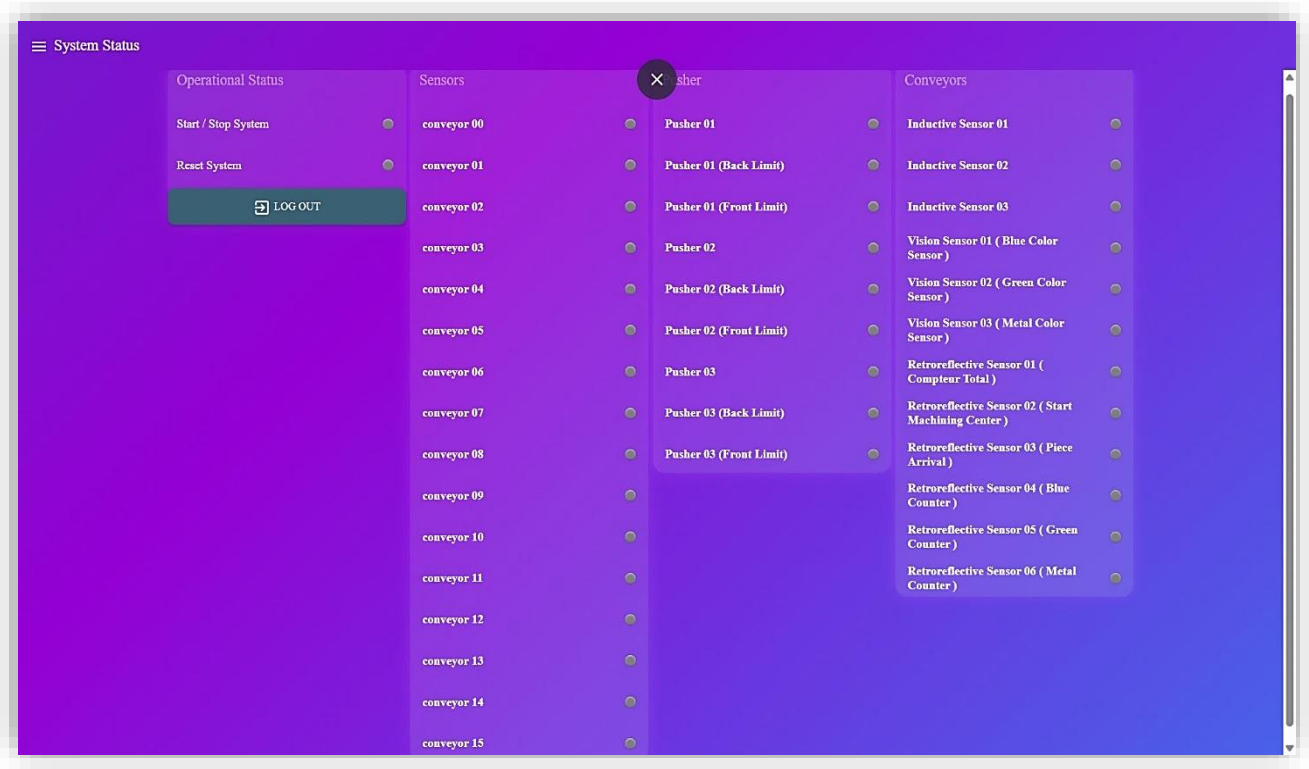


Figure III.67 : Interface de supervision de l'état du système et des équipements

- Cette interface de supervision permet de contrôler et de surveiller le système automatisé de la station de tri en temps réel. Elle offre à l'utilisateur la possibilité d'accéder au système via une page d'authentification, de piloter le processus de production à l'aide des commandes principales (Start, Stop, Reset) et de suivre l'évolution de la production des différentes pièces. Elle permet également de visualiser l'état des équipements industriels tels que les convoyeurs, les vérins et les capteurs, facilitant ainsi le suivi du fonctionnement du système et la détection rapide des anomalies.

- **Exemples de fonctionnement du système :**

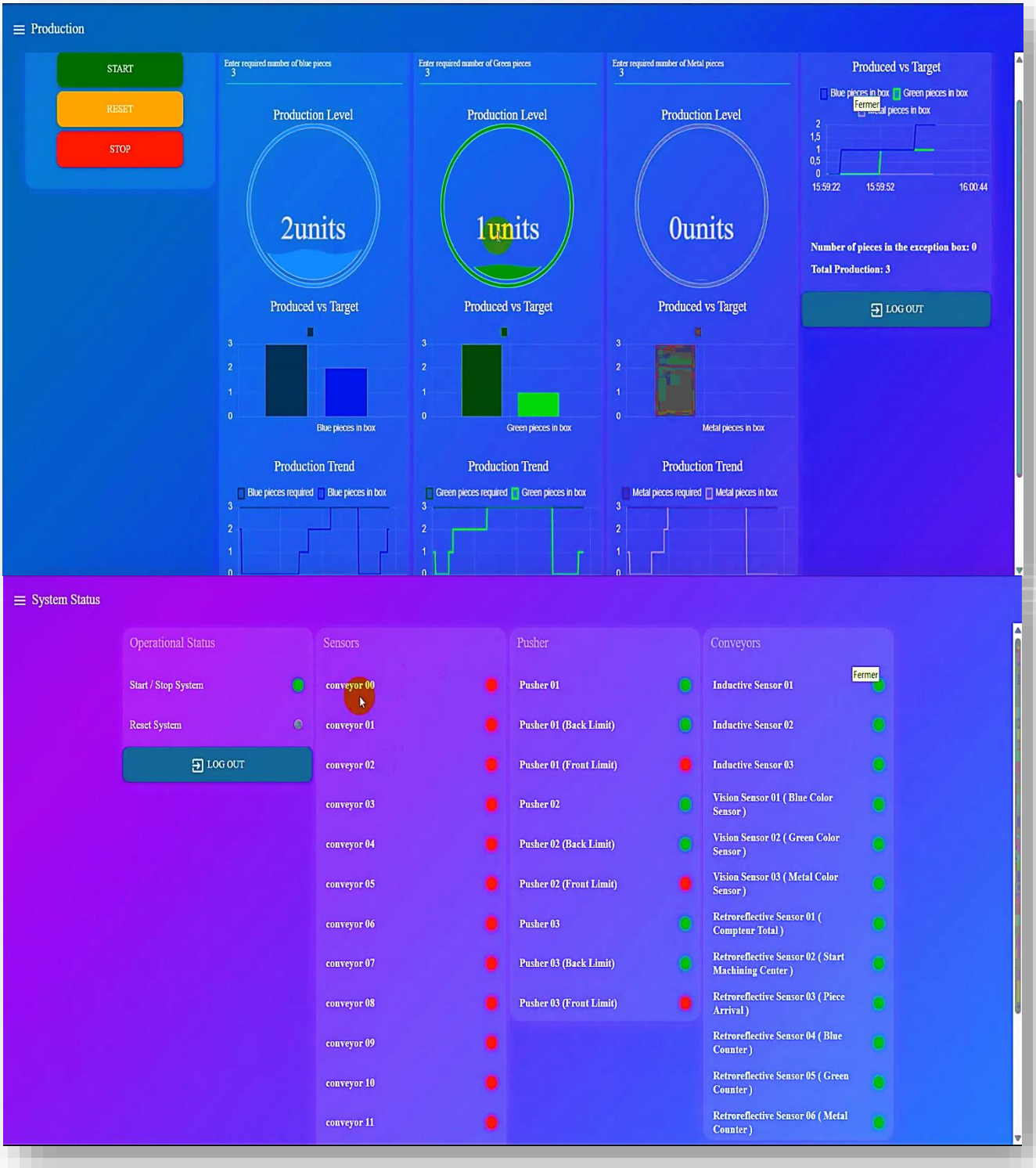


Figure III.68 : Interface de supervision et de contrôle du système de tri sous Node-RED

III.9 Discussions des résultats obtenus

- L'intégration entre TIA Portal, Factory I/O et Node-RED a permis la mise en œuvre d'un système de tri automatisé fonctionnel et cohérent, assurant une communication fluide entre la partie commande, la simulation industrielle et l'interface de supervision.
- La simulation sous Factory I/O a confirmé le bon fonctionnement mécanique de la station de tri (convoyeurs, Vérins, capteurs) ainsi que la cohérence des scénarios de détection et d'orientation des pièces.
- La programmation sous TIA Portal a permis d'assurer une logique de contrôle stable, incluant la gestion des compteurs, des temporisations, des conditions de tri et des sécurités (Start, Stop, Reset, arrêt d'urgence).
- Les tests effectués ont montré que les pièces sont correctement détectées, identifiées et orientées vers la direction appropriée selon leur type (bleue, verte, métallique ou non spécifiée).
- L'interface Node-RED a offert une visualisation claire et dynamique des états du système, facilitant le suivi en temps réel des capteurs, des actionneurs et des niveaux de production.
- Les graphiques et indicateurs de performance (Production Level, Production Trend, Produced vs Target) ont permis d'analyser l'efficacité du système et d'évaluer le respect des objectifs de production.
- L'analyse de la forme de la courbe (ligne continue) constitue un indicateur fiable pour identifier une anomalie ou une panne au sein des équipements du système.
- La transmission des données via le protocole de communication a démontré une stabilité satisfaisante, sans perte significative d'informations pendant les phases de test.
- Le système a permis d'identifier rapidement les anomalies potentielles (capteur inactif, fin de course non détectée, arrêt du convoyeur), améliorant ainsi la capacité de diagnostic.
- Globalement, les résultats obtenus confirment que la solution proposée assure une automatisation fiable, une supervision efficace et une bonne coordination entre la commande industrielle et l'interface IoT.

III.10 Perspectives

- Amélioration du système par l'intégration d'un API réel afin de tester la station dans un environnement industriel physique et non seulement simulé.
- Mise en place d'un système de maintenance prédictive, basé sur l'analyse des données collectées (capteurs, temps de cycle, fréquence des arrêts).
- Intégration d'un protocole industriel plus avancé (OPC UA sécurisé, MQTT industriel) pour renforcer la fiabilité et la cybersécurité de la communication.
- Ajout d'une base de données pour l'archivage historique des productions et l'analyse statistique des performances.
- Développement d'une interface plus avancée sous Node-RED ou d'une application web/mobile pour une supervision à distance.
- Amélioration de la logique de tri en intégrant un système de vision industrielle plus précis (caméra intelligente) pour détecter des défauts ou des erreurs de classification.
- Intégration d'un système MES (Manufacturing Execution System) pour connecter la station de tri à une chaîne de production intelligente dans le cadre de l'Industrie 4.0.
- Ajout de fonctions avancées d'alarme et de diagnostic automatique pour réduire les temps d'arrêt.
- Extension de la station pour permettre le tri selon plusieurs critères supplémentaires (taille, poids, défaut de surface, etc.).

III.11 Conclusion

- Ce chapitre a présenté la conception, l'automatisation et la simulation d'une station de tri industrielle basée sur l'utilisation conjointe de TIA Portal, Factory I/O et Node-RED. L'étude a permis de mettre en œuvre une logique de commande fiable assurant la détection, l'identification et l'orientation automatique des pièces selon leur type (bleu, vert, métallique).
- La simulation sous Factory I/O a validé le fonctionnement mécanique du système, tandis que la programmation sous TIA Portal a garanti une gestion correcte des capteurs, des actionneurs, des temporisations et des sécurités (Start, Stop, Reset, arrêt d'urgence). L'intégration de Node-RED a offert une interface de supervision claire, permettant le suivi en temps réel des états du système, des niveaux de production et des indicateurs de performance.
- Les résultats obtenus démontrent la cohérence et la fiabilité de la solution

proposée, ainsi que la bonne synchronisation entre la partie commande industrielle et la couche de supervision. Ce travail confirme ainsi l'efficacité d'une approche intégrée combinant automatisation, simulation et visualisation des données dans le cadre d'une application industrielle inspirée des principes de l'Industrie 4.0.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons mené une étude complète portant sur la conception et la simulation d'un **système de tri automatisé**, ancré dans les principes de l'**Industrie 4.0**. Ce projet a permis de mettre en exergue l'importance cruciale de l'intégration des technologies numériques pour accroître les performances et la réactivité des systèmes de production modernes.

Le recours à la modélisation 3D et à la simulation via **Factory I/O** a constitué une étape déterminante. Elle nous a offert un environnement immersif et réaliste pour tester, ajuster et valider les fonctionnalités logiques du système avant toute implémentation physique. Parallèlement, le développement de la logique de commande sur **Automate Programmable Industriel (API)** a permis d'assurer une gestion rigoureuse des actionneurs et des capteurs, garantissant ainsi la fiabilité et la sécurité du processus de tri.

L'innovation de cette approche réside également dans l'utilisation de **Node-RED** comme outil de supervision. Cette interface a non seulement permis un suivi en temps réel du système, mais a aussi facilité l'interfaçage des données, optimisant ainsi la prise de décision. Cette synergie technologique démontre tout l'intérêt du concept de **jumeau numérique** dans l'optimisation continue des processus industriels [32].

Les résultats obtenus confirment que l'automatisation, couplée à la simulation avancée, constitue un levier puissant pour améliorer la productivité, réduire les coûts opérationnels et accroître la flexibilité des infrastructures industrielles.

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة معمقة حول تصميم وأتمتة ومحاكاة نظام فرز صناعي يعتمد على التعرف اللوني. يندرج هذا العمل ضمن إطار مفاهيم الصناعة 4.0، حيث يهدف إلى تحسين أداء أنظمة الإنتاج من خلال دمج تقنيات رقمية متقدمة.

تعتمد المنهجية على بنية متكاملة ترتكز على Automate Programmable Industriel (API)للتحكم في الحساسات والمشغلات، بالإضافة إلى استخدام برنامج Factory I/Oفي النمذجة والمحاكاة ثلاثية الأبعاد، و Node-REDلمراقبة النظام واستغلال البيانات في الوقت الحقيقي.

كما سمح اعتماد مفهوم التوأم الرقمي (Digital Twin) بالتحقق من صحة منطق التحكم، وتحسين تدفق العمليات، وتقليل المخاطر التقنية قبل التطبيق الفعلي. وتُظهر النتائج أن هذا التكامل بين التقنيات يساهم بشكل كبير في رفع الإنتاجية، وتحسين الدقة، وزيادة موثوقية نظام الفرز.

الكلمات المفتاحية :الصناعة 4.0، الأتمتة، Factory I/O، Node-RED، التوأم الرقمي، نظام الفرز.

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie portant sur la conception, l'automatisation et la simulation d'un **système de tri industriel** par reconnaissance colorimétrique. S'inscrivant dans le paradigme de l'**Industrie 4.0**, ce projet vise à optimiser la performance des systèmes de production par l'intégration de technologies numériques avancées.

La démarche repose sur une architecture articulée autour d'un **Automate Programmable Industriel (API)** pour le pilotage des capteurs et actionneurs, du logiciel **Factory I/O** pour la modélisation et la simulation 3D, ainsi que de **Node-RED** pour la supervision et la valorisation des données en temps réel.

L'approche par **jumeau numérique** a permis de valider la logique de commande, d'optimiser les flux et de minimiser les risques techniques avant toute implémentation physique. Les résultats démontrent qu'une telle synergie technologique améliore significativement la productivité, la précision et la fiabilité du processus de triage.

Mots-clés : Industrie 4.0, Automatisme, Factory I/O, Node-RED, Jumeau numérique, Système de tri.

Abstract

This thesis presents an in-depth study on the design, automation, and simulation of an industrial sorting system based on color recognition. This work is part of the Industry 4.0 paradigm and aims to enhance the performance of production systems through the integration of advanced digital technologies.

The methodology is based on an integrated architecture built around a Programmable Logic Controller (PLC) for controlling sensors and actuators, along with the use of Factory I/O for 3D modeling and simulation, and Node-RED for system monitoring and real-time data management.

The adoption of the Digital Twin approach enabled the validation of control logic, optimization of process flows, and reduction of technical risks prior to physical implementation. The results demonstrate that such technological integration significantly improves productivity, accuracy, and reliability of the sorting process.

Keywords: Industry 4.0, Automation, Factory I/O, Node-RED, Digital Twin, Sorting System.

Annexes

❖ Modélisation Détaillée et Analyse des Cycles de Commande (Grafcet)

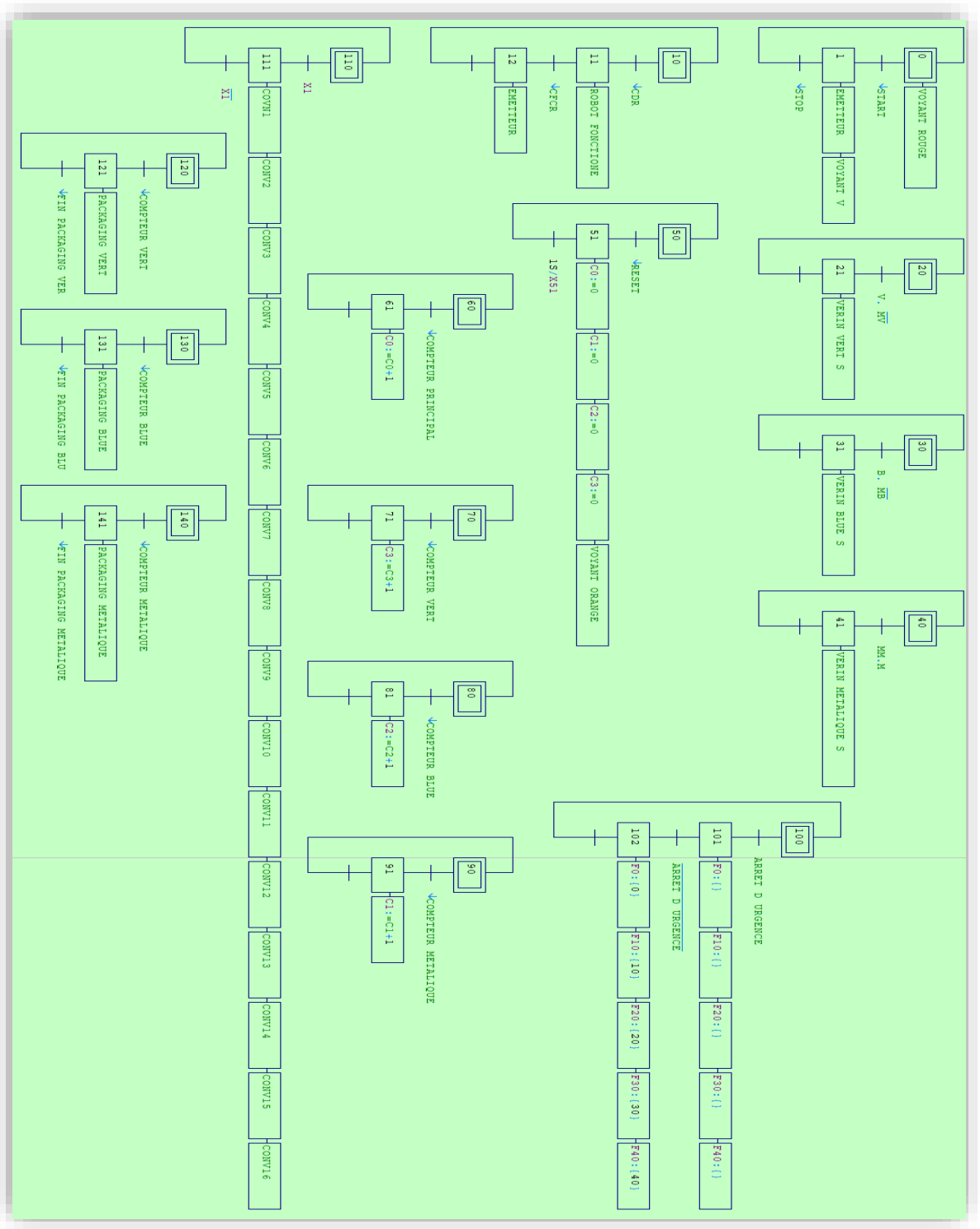


Figure 1 : Grafcet Générale

1. Inventaire Complet des Variables I/O (Table des Symboles)

Cette annexe présente une analyse approfondie de la logique de commande du système de tri. Elle détaille l'intégralité des variables d'entrée/sortie et décompose le fonctionnement de chaque cycle modélisé par Grafcet.

Catégorie	Symbole	Symbole	Fonction Description
Commandes	Start	I0	Bouton poussoir de mise en marche
	Stop	I1	Bouton poussoir d'arrêt
	Reset	I15	Réinitialisation des compteurs
	Arrêt d'urgence	I17	Sécurité matérielle prioritaire
Capteurs	v / b / m	I2 / I5 / I9	Détection couleur (Vert, Bleu) et matière (Métal)
	cdr	I14	Détection présence pièce pour démarrage robot
	Cfcr	I16	Fin de course du robot de manipulation
Actionneurs	EMETTEUR	O2	Génération des pièces en amont
	COVN1 à 16	O12 à O27	Moteurs des 16 segments de convoyage
	VERIN S (V, B, M)	O4 / O5 / O6	Sortie des tiges des vérins de tri

Tableau 1 : Table des symboles

2. Démonstration et Analyse des Cycles Grafcet

2.1. Gestion du Cycle Principal (Mise en service)

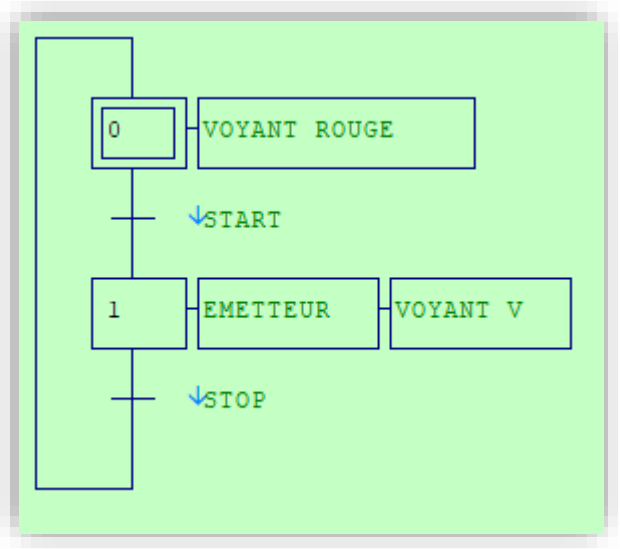


Figure 2 : Mise en service

- Le Grafcet G0 assure la transition entre l'état de repos et l'état actif.

1) **Étape 0 :** État initial, le voyant rouge est activé (système à l'arrêt).

- Transition START : L'appui sur le bouton marche (I0) valide le passage à l'étape 1.

2) **Étape 1 :** Activation de l'émetteur de pièces (O2) et du voyant vert (O3). Le système est prêt à traiter les flux.

- Transition STOP : L'appui sur I1 ramène le système à l'état de repos.

2.2.Automatisme de Convoyage (Transport)

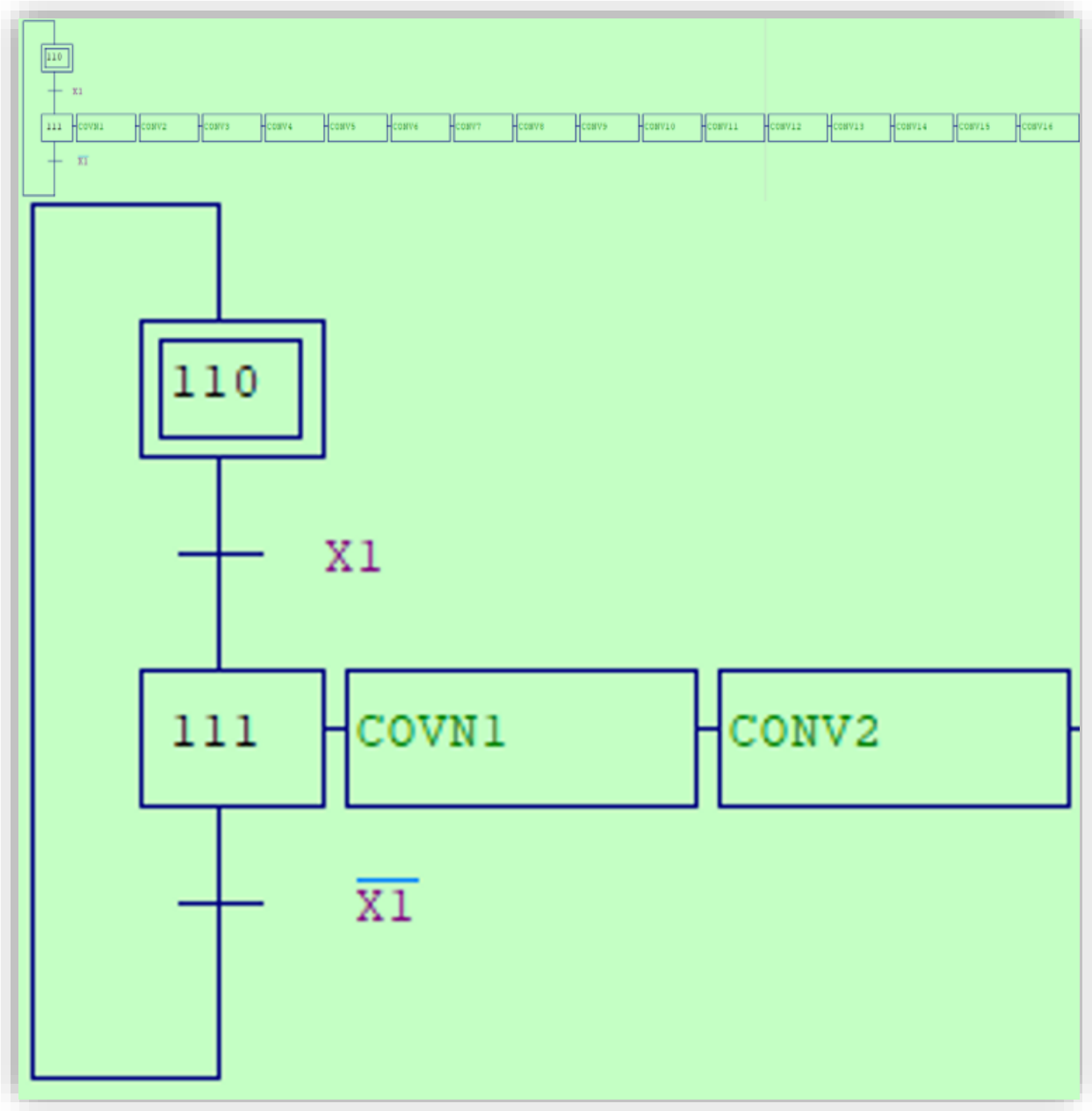


Figure 3 : Transport

Le Grafcet G110 pilote la ligne de transport. Dès que la condition de marche (X1) est validée, l'étape 111 active simultanément les 16 sorties COVN1 à COVN16. Cela garantit un mouvement fluide sur toute la longueur de la chaîne de tri. Le cycle s'arrête lorsque la condition de marche n'est plus remplie (inverse de X1).

2.3. Logique de Tri Spécifique (Vérins)

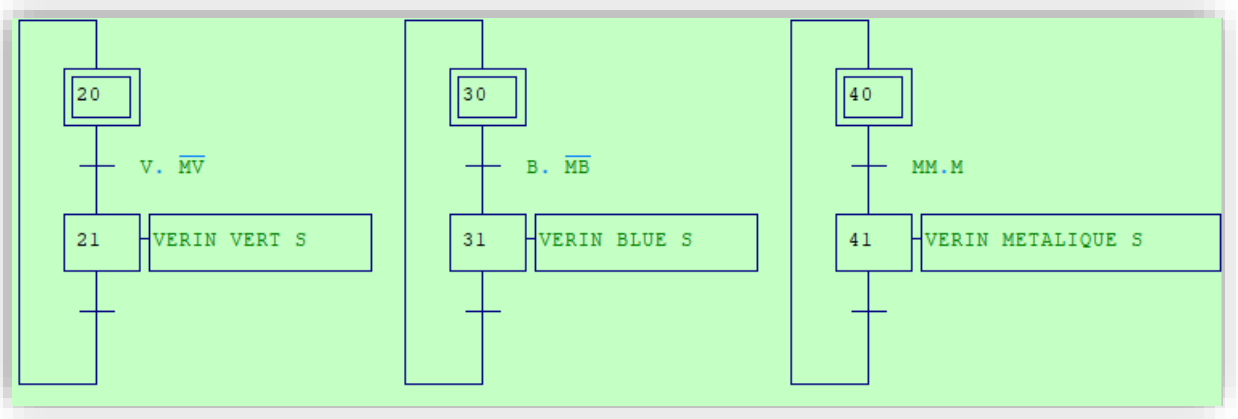


Figure 4 : Vérins

- Les Grafcets G20, G30 et G40 fonctionnent en parallèle pour identifier et éjecter les pièces :

1) **Tri Vert :** Si le capteur v détecte une pièce et que le moteur de tri MV est actif, le VERIN VERT S est piloté (Étape 21).
2) **Tri Bleu :** Logique identique avec le capteur b activant le VERIN BLUE S (Étape 31).
3) **Tri Métallique :** Utilise le capteur inductif mm pour activer le VERIN METALIQUE S (Étape 41).

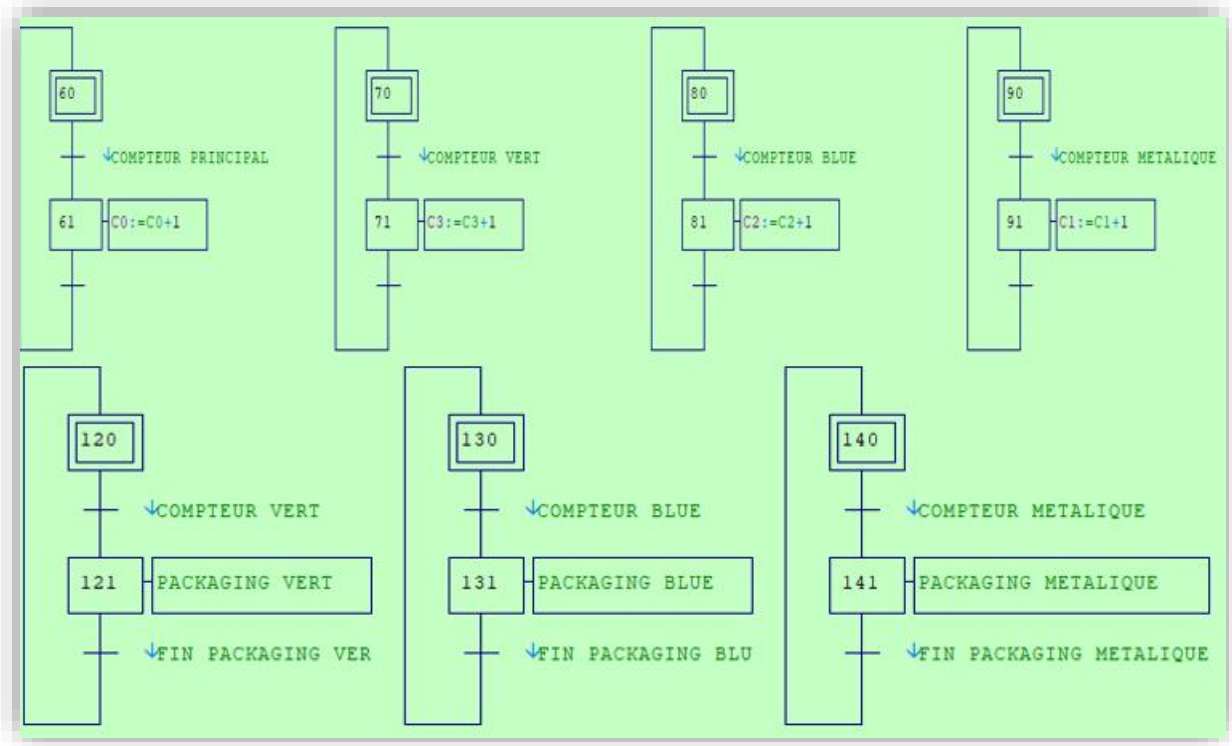


Figure 5 : Traitement Final et Comptage

2.4. Traitement Final et Comptage

Une fois la pièce dirigée vers la bonne goulotte, les Grafcets de Packaging (G120, G130, G140) prennent le relais. L'activation de la mise en boîte est conditionnée par l'incrémentation des compteurs respectifs (C1, C2, C3). Parallèlement, le Grafcet G60 à G90 gère l'aspect mathématique (C0 = C0 + 1), permettant une mise à jour instantanée des afficheurs de supervision (Principal, Vert, Bleu, Métal).

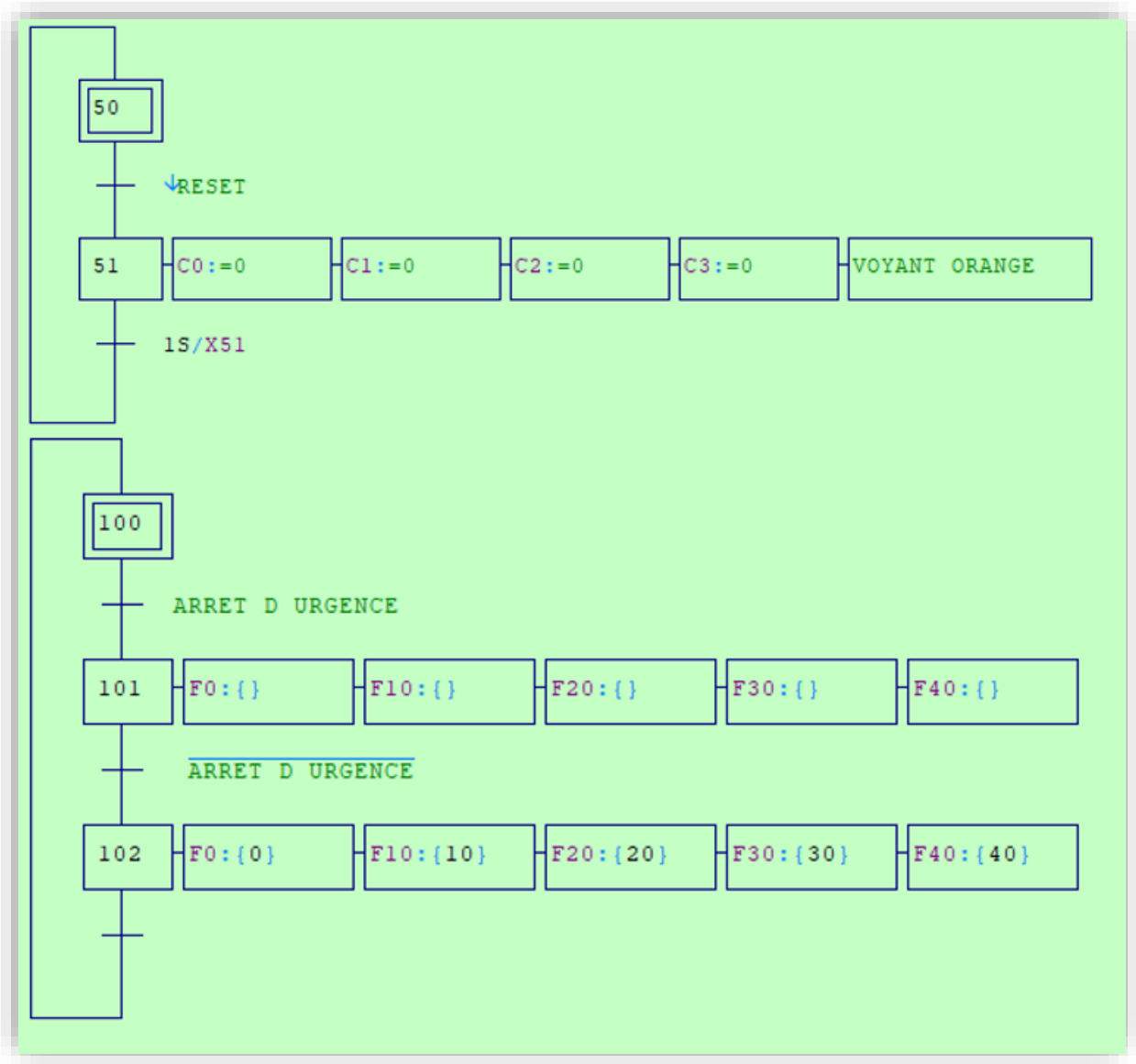


Figure 6 : Sécurité et Réinitialisation

2.5. Sécurité et Réinitialisation

Le Grafcet G100 surveille l'arrêt d'urgence (I17). En cas d'activation (Étape 101), tous les forçages (F0, F10, etc.) sont mis à vide pour stopper immédiatement toute action mécanique. Le Grafcet G50 permet quant à lui de remettre à zéro (RESET) l'ensemble des

compteurs et d'activer le voyant orange pour signaler une phase de maintenance ou de remise à l'état initial.

❖ Bibliographie

[1] **Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J.** (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. German National Academy of Science and Engineering (acatech).

[2] **Monostori, L.** (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13.

[3] **Banks, J., Carson, J., Nelson, B., & Nicol, D.** (2010). *Discrete-Event System Simulation* (5th ed.). Prentice Hall.

[4] **Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.** (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.

[5] **FlexSim Software Products, Inc.** (2023). *FlexSim Simulation Software – User Guide*. Available at: https://www.flexsim.com

[6] **Schwab, K.** (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.

[7] **Mell, P., & Grance, T.** (2011). *The NIST Definition of Cloud Computing*. National Institute of Standards and Technology.

[8] **Azuma, R.** (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385.

[9] **Real Games.** (2023). *Factory I/O – Industrial Automation Simulation Software*. Available at: https://factoryio.com

[10] **Siemens Digital Industries Software.** (2022). *Tecnomatix Plant Simulation Documentation*. Siemens.

[11] **Versteeg, H., & Malalasekera, W.** (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Pearson Education.

[12] **Kelton, W., Sadowski, R., & Sturrock, D.** (2014). *Simulation with Arena* (6th ed.). McGraw-Hill.

[13] **ISO 31000.** (2018). *Risk Management – Guidelines*. International Organization for Standardization.

[14] **Law, A.** (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th ed.). McGraw-Hill.

[15] **Kagermann, H., Wahlster, W**., & **Helbig, J**. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Acatech – National Academy of Science and Engineering, Germany.

[16] **Groover, M. P**. (2020). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing (5th ed.). Pearson.

[17] **Bolton, W**. (2015). Programmable Logic Controllers (6th ed.). Newnes.

[18] **Siciliano, B., & Khatib, O**. (2016). Springer Handbook of Robotics. Springer.

[19] **Levrat, E**. (2008). Automatisation des systèmes de production. Hermès Science.

[20] **Siemens.** (2023). Industrial automation systems documentation. Siemens AG.

[21] **Borne, J.** (2007). Automatique industrielle. Dunod.

[22] **Schneider Electric**. (2022). Industrial automation guide. Schneider Electric.

[23] **International Organization for Standardization**. (2012). ISO 8373: Robots and robotic devices — Vocabulary. ISO.

[24] **Source IP Systèmes. (s.d.).** *Définition d'un API – Automate Programmable Industriel*.

[25] **Grieves, M**. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Product Representation. White Paper, 2014.

[26] **Siemens AG**. SIMATIC TIA Portal v17/v18/v19 Documentation. Siemens Industry Online Support.

[27] **Berger, H**. Automating with SIMATIC S7-1500: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional. Publicis Publishing, 2018.

[28] **Node-RED.** (2023). Node-RED documentation. OpenJS Foundation.

[29] **O'Leary, P.** (2019). Node-RED Guide. Leanpub

[30] **Banks, A., & Gupta, R.** (2014). MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard.

[31] **Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M.** (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. Procedia Manufacturing, 11, 939–948.

[32] **Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C.** (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(4), 2405–2415.