الجـــــــــــــــــــــمهـوريـــــة الجـــــــــــــزائريـة الديمـــــــقـراطيـة الشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــعليـم العـــــــالي و البـــــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلمســـــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de Production

Par:

- BENADDI Sidi Mohammed Mehdi
- AL SHAIKH QASEM Jasser

Développement d'un jumeau numérique de la station Distribution du FESTO MPS 500 via Siemens NX avec intégration de TIA Portal

Soutenu publiquement, le 18 / 06 /2026 , devant le jury composé de :

Mme.GHOMRI Latéfa	Professeur	Univ_Tlemcen	Président
Mme.KEDDARI Nassima	MCB	Univ_Tlemcen	Examinateur1
Mme. BOUMEDIENE Fatima Zohra	MCB	Univ_Tlemcen	Examinateur2
M.HASSAM Ahmed	MCB	Univ_Tlemcen	Encadrant
M.MKEDDER Med El Amin	Enseignant Vacataire	Univ_Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2025 /2026

DÉDICACE

Nous dédions ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts et de persévérance, à ceux qui ont toujours été présents dans les moments les plus importants de notre parcours.

À nos très chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement notre profonde gratitude pour tous les sacrifices consentis, l'amour infini, les prières sincères et le soutien inconditionnel qu'ils nous ont offerts depuis toujours. Que ce travail soit pour eux un symbole de reconnaissance et de fierté.

À nos familles et à nos proches, pour leur présence, leurs encouragements et leur confiance qui nous ont donné la force d'avancer malgré les difficultés.

À nos amis et collègues, avec qui nous avons partagé des souvenirs, des défis et des moments inoubliables tout au long de notre parcours universitaire.

À nos encadreurs, Mr Hassam et Mr Mkedder, pour leurs précieux conseils, leur patience et leur accompagnement durant la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous nous dédions ce travail à nous-mêmes, pour les efforts fournis, les nuits de travail, la patience et la détermination qui nous ont permis d'atteindre cette étape importante de notre vie universitaire.

Que ce mémoire soit le début d'un avenir rempli de réussite, d'ambition et d'accomplissements.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Ce mémoire représente l'aboutissement de longues années d'efforts soutenus, d'apprentissage assidu et d'une persévérance qui ne s'est jamais démentie. Derrière chaque page rédigée, chaque difficulté surmontée et chaque objectif atteint, se trouvent des personnes qui ont éclairé notre chemin, nous ont soutenus et accompagnés tout au long de ce long parcours. Nous ne pouvons que nous arrêter pour leur exprimer notre profonde gratitude.

Nous tenons à exprimer notre plus sincère reconnaissance à nos encadreurs, M. HASSAM Ahmed et M. MKEDDER Med El Amin, ainsi qu'aux membres du jury, Mme GHOMRI Latéfa, Mme KEDDARI Nassima et Mme BOUMEDIENE Fatima Zohra. Car tous ces enseignants n'ont pas seulement joué un rôle d'encadrement ou d'évaluation ; leur apport dépasse de loin ce cadre, puisqu'ils nous ont accompagnés dès les premières années de notre formation universitaire, nous transmettant leur savoir, leur expérience et leurs précieux conseils à chaque étape de notre parcours. Nous leur adressons nos remerciements les plus sincères pour tout le temps, les efforts et le dévouement qu'ils ont consacrés à notre formation, tant sur le plan scientifique que méthodologique.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants du département qui ont contribué à notre formation tout au long de nos années d'études, nous transmettant leur savoir avec dévouement et professionnalisme. Chaque cours reçu a laissé sa trace dans la construction de notre identité scientifique.

Nos remerciements vont aussi à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'élaboration et à l'achèvement de ce travail, que ce soit par un conseil avisé, un encouragement dans un moment de doute, ou un soutien moral qui ne nous a jamais fait défaut.

Nous tenons enfin à adresser une pensée toute particulière à nos familles, qui n'ont jamais cessé de faire des sacrifices, de nous accorder leur confiance et de nous prodiguer un soutien inconditionnel et des encouragements permanents à chaque instant. Leur présence à nos côtés a toujours été et demeure notre plus grande source de force et notre plus puissante motivation à avancer, quelles que soient les difficultés rencontrées.

À tous ceux qui ont cru en nous et nous ont aidés à cheminer sur cette voie, nous adressons nos remerciements les plus sincères et notre plus profonde reconnaissance. Que Dieu récompense chacun d'entre eux comme il se doit.

TABLE DES MATIÈRE

DÉDICACE 0
REMERCIEMENTS 1
TABLE DES MATIÈRE 2
LISTE DES FIGURES 4
LISTE DES TABLEAUX 5
Liste des abréviations 6
INTRODUCTION GENERALE 7
CHAPITRE I 9
INTRODUCTION 10
1.1 Le Jumeau Numérique : Concepts et État de l'Art 10
1.1.1 Définition et évolution du concept de Digital Twin 10
1.1.2 Les trois composantes fondamentales 12
1.1.3 Niveaux de maturité 13
1.1.4 Applications industrielles et revue de la littérature 15
1.2 Présentation de la Station Distribution du FESTO MPS 500 16
1.2.1 Architecture générale du système MPS 500 16
1.2.2 Description détaillée de la station Distribution 17
1.2.3 Fonctionnement séquentiel 18
1.2.4 Capteurs, actionneurs et interfaces 20
1.3 Outils Technologiques Utilisés 21
1.3.1 Siemens NX 21
1.3.2 TIA Portal 22
1.3.3 Protocoles de communication 24
CONCLUSION 25
CHAPITRE II 27
INTRODUCTION 28
2.1 Modélisation CAO 3D 29
2.1.1 Acquisition du modèle géométrique initial 29
2.1.2 Processus d'importation dans Siemens NX 30
2.1.4 Passage au module Mechatronics Concept Designer 31
2.2 Configuration de la Simulation dans le Module MCD (Mechatronics Concept Designer) 32
2.2.1 Définition des corps 32
2.2.2 Modélisation des liaisons 35

2.2.3 Paramétrage des E/S 44
2.3 Validation du Comportement Cinématique 47
Conclusion 50
CHAPITRE III 51
INTRODUCTION 52
3.1 Programmation de l'Automate dans TIA Portal 53
3.1.1 Configuration matérielle 53
3.1.2 Développement du GRAFCET 54
3.1.3 Implémentation en LAD/SFC 56
..... 66
3.2 Couplage entre Siemens NX et TIA Portal 67
3.2.1 Mise en place de la communication : liaison signal directe et OPC UA 67
3.2.2 Mapping des variables et correspondance des entrées/sorties 71
3.2.3 Tests de communication et validation du couplage 73
3.2.4 Architecture globale du jumeau numérique 75
3.3 Simulation Globale et Validation du Jumeau Numérique 76
3.3.1 Exécution du cycle complet de la station 76
3.3.2 Validation fonctionnelle : comparaison comportement réel / simule 78
3.3.3 Tests de scénarios : fonctionnement normal et anomalies de simulation identifiées 79
..... 85
3.3.4 Analyse des performances et des apports du jumeau numérique 85
CONCLUSION GÉNÉRALE 89
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 91

LISTE DES FIGURES

1-Figure 2.1 : Paramètres de mesure 31
2-Figure 2.2 : Quelques corps rigides de la première sous-station 32
3-Figure 2.3 : Quelques corps rigides de la deuxième sous-station 33
4-Figure 2.4 : limites de mouvement du capteur 35
5-Figure 2.5 : Capteur de l'aspiration / relâchement 38
6-Figure 2.6 : Angle de mouvement du bras pivotant 39
7-Figure 2.7 : La partie responsable de l'aspiration/du relâchement 40
8-Figure 2.8 : Conditions d'aspiration dans l'éditeur de séquence 41
9-Figure 2.9 : Conditions de changement de couleur des voyants 42
10-Figure 2.10 : Quelques conditions d'activation et désactivation de prévention de collision 43
11-Figure 2.11 : Nom d'alias et nom de signal pour la création d'une formule 45
12-Figure 2.12 : Contenu de la fenêtre de signal 46
13-Figure 2.13 : Le cas particulier du capteur de longueur 47
14-Figure 3.1 : Graph de sécurité de sous-station 1 61
15-Figure 3.2 : Graph de fonctionnement de sous-station 1 63
16-Figure 3.3 : Graph de sécurité de sous-station 2 65
17-Figure 3.4 : Graph de fonctionnement de sous-station 2 66
18-Figure 3.5 : Interface de PLCSIM-Advanced 69
19-Figure 3.6 : Le changement après avoir cliqué sur « Liaison en ligne » 69
20-Figure 3.7 : Signal Connection dans NX-MCD 70
21-Figure 3.8 : Contrôle de l'état du système via TIA 71
22-Figure 3.9 : Toutes les variables dans TIA 72
23-Figure 3.10 : L'état pour que le Vérin sorte dans le cycle 74
24-Figure 3.11 : Tous les programmes nécessaires à la simulation 76

LISTE DES TABLEAUX

1-Tableau 2.1 : Dimensions des composants principaux 30
2-Tableau 2.2 : Types de corps de collision dans le système 34
3-Tableau 3.1 : Table de variables 59
4-Tableau 3.2 : L'étape 1 et transition de GS SS-1 59
5-Tableau 3.3 : L'étape 2 et transition de GS SS-1 60
6-Tableau 3.4 : L'étape 3 et transition de GS SS-1 60
7-Tableau 3.5 : L'étape 1 et transition de GF SS-1 61
8-Tableau 3.6 : L'étape 2 et transition de GF SS-1 61
9-Tableau 3.7 : L'étape 3 et transition de GF SS-1 62
10-Tableau 3.8 : L'étape 4 et transition de GF SS-1 62
11-Tableau 3.9 : L'étape 5 et transition de GF SS-1 62
12-Tableau 3.10 : L'étape 6 et transition de GF SS-1 63
13-Tableau 3.11 : L'étape 1 et 2 et transitions de GS SS-2 64
14-Tableau 3.12 : L'étape 3 et transition de GS SS-2 64
15-Tableau 3.13 : L'étape 1 et transition de GF SS-2 65
16-Tableau 3.14 : L'étape 2 et transition de GF SS-2 65
17-Tableau 3.15 : L'étape 3 et 4 et transitions de GF SS-2 66
18-Tableau 3.16 : L'étape 5 et transition de GF SS-2 66
19-Tableau 3.17 : Comparaison entre liaison directe et OPC UA 68
20-Tableau 3.18 : Exemple de signaux de sortie API vers NX MCD 72
21-Tableau 3.19 : Exemple de signaux de retour NX MCD vers API 73
22-Tableau 3.20 : Les résultats et observations de quelque tests 74
23-Tableau 3.21 : Critères de validation et leurs résultats dans le système final 79
24-Tableau 3.22 : Les différents scénarios 85
25-Tableau 3.23 : Les limites opérationnelles 88

Liste des abréviations

API	Automate Programmable Industriel
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
E/S	Entrées / Sorties
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FMS	Flexible Manufacturing System
IAO	Ingénierie Assistée par Ordinateur
IHM	Interface Homme-Machine
IoT	Internet of Things (Internet des Objets)
JN	Jumeau Numérique
LAD	Ladder Diagram (schéma à contacts)
MCD	Mechatronics Concept Designer
MPS	Modular Production System
NX	Siemens NX (logiciel CAO/simulation)
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PFE	Projet de Fin d'Études
PLM	Product Lifecycle Management
SFC	Sequential Function Chart
TIA	Totally Integrated Automation
VC	Virtual Commissioning
PLCSIM	PLC Simulation

:

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie mondiale traverse, depuis la fin de la première décennie du XXIe siècle, une mutation profonde, souvent désignée sous le terme d'Industrie 4.0. Ce phénomène, initié en Allemagne et rapidement adopté à l'échelle internationale, repose sur la convergence de technologies numériques jusqu'alors disjointes : l'internet des objets industriels, le cloud computing, la simulation avancée, la robotique collaborative et les jumeaux numériques. Dans ce contexte, la frontière entre le monde physique des machines et le monde virtuel des données tend à s'estomper progressivement, ouvrant la voie à des systèmes de production capables de s'auto-diagnostiquer, de s'adapter en temps réel et d'anticiper les défaillances.

Les systèmes automatisés de production constituent le cœur opérationnel de cette transformation. Leur complexité croissante, associée aux exigences toujours plus strictes en matière de productivité, de qualité et de disponibilité, nécessite des outils de conception, de validation et d'exploitation qui dépassent largement les approches traditionnelles. C'est précisément dans cette dynamique que s'inscrit le concept de jumeau numérique, désormais reconnu comme un pilier incontournable de l'Industrie 4.0.

La mise en service d'un système automatisé constitue une étape critique, souvent source de retards, de surcoûts et de risques techniques. Les méthodes classiques de validation comme les essais sur prototype et les tests de réception sur site, présentent des limites évidentes : elles nécessitent la disponibilité de l'installation physique, mobilisent des ressources importantes et ne permettent pas toujours de détecter les erreurs de programmation avant qu'elles n'aient des conséquences opérationnelles. La nécessité de disposer d'un outil de simulation suffisamment fidèle pour reproduire le comportement réel d'une installation, et suffisamment couplé pour dialoguer avec le programme automate, est ainsi devenue une priorité industrielle.

Dans notre travail on a choisi la station Distribution du FESTO MPS 500 qui présente un ensemble de caractéristiques qui en font un cas d'étude idéal : richesse technologique (mécanique, pneumatique, électrique, automatisme), représentativité des problématiques industrielles de manutention et d'alimentation en pièces, compatibilité

native avec les outils Siemens NX et TIA Portal, et accessibilité dans le cadre d'un laboratoire universitaire.

Ce mémoire poursuit quatre objectifs complémentaires, à savoir : la réalisation d'une modélisation CAO 3D complète et paramétrique de la station Distribution sous Siemens NX, la configuration de la simulation mécatronique dans le module MCD, incluant la définition des corps, des liaisons ainsi que des capteurs et actionneurs virtuels, le développement d'un programme de commande sous TIA Portal validé par simulation à l'aide de PLCSIM Advanced, et enfin l'intégration des deux environnements via OPC UA en vue de mettre en œuvre une co-simulation représentative d'un jumeau numérique opérationnel.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente le cadre théorique du jumeau numérique, la station Distribution du FESTO MPS 500, ainsi que les outils logiciels mobilisés. Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation CAO 3D et à la configuration de la simulation mécatronique. Le troisième chapitre traite de l'intégration avec TIA Portal et de la validation globale du jumeau numérique. Enfin, une conclusion générale vient synthétiser les principaux apports du travail et proposer des perspectives d'amélioration.

CHAPITRE I

Étude Bibliographique et Présentation du Système

INTRODUCTION

L’émergence de l’Industrie 4.0 a profondément transformé les méthodes de conception, de supervision et de validation des systèmes industriels. Dans ce contexte, le jumeau numérique s’est imposé comme une technologie innovante permettant de créer une représentation virtuelle fidèle d’un système physique afin d’analyser son comportement, d’optimiser ses performances et de réduire les risques liés à sa mise en service.
Ce chapitre présente les fondements théoriques du jumeau numérique à travers sa définition, ses composantes, ses niveaux de maturité ainsi que ses principales applications industrielles. Il introduit également la station Distribution du FESTO MPS 500, support expérimental de ce projet, en décrivant son architecture, ses composants mécaniques, pneumatiques et électriques, ainsi que son fonctionnement séquentiel. Enfin, les principaux outils technologiques utilisés pour la réalisation du jumeau numérique, notamment Siemens NX/MCD, TIA Portal, PLCSIM Advanced et le protocole OPC UA, sont présentés. Cette étude constitue la base nécessaire à la compréhension et au développement du jumeau numérique détaillé dans les chapitres suivants.

1.1 Le Jumeau Numérique : Concepts et État de l'Art

1.1.1 Définition et évolution du concept de Digital Twin

1.1.1.1 Origine historique du concept

L'idée d'une représentation virtuelle d'un système physique n'est pas entièrement nouvelle : dès les premières décennies de l'ère informatique, les ingénieurs ont cherché à construire des modèles numériques capables de simuler le comportement des machines et des structures. Cependant, c'est au début des années 2000 que le concept prend véritablement forme sous la plume de MICHAEL GRIEVES, alors professeur à l'Université du Michigan, dans le cadre de ses travaux sur le Product Lifecycle Management (PLM). GRIEVES introduit alors la notion d'Information Mirroring Model, qu'il décrit comme une représentation virtuelle d'un produit physique, capable de refléter en temps quasi réel l'état et le comportement de son homologue matériel [1]. Cette intuition fondatrice pose les jalons d'une révolution méthodologique qui ne se manifestera

pleinement qu'une décennie plus tard, portée par la convergence de l'internet des objets, des capteurs connectés et de la puissance de calcul des environnements cloud.

Le terme « jumeau numérique » (digital twin) gagne progressivement en visibilité dans la littérature scientifique à partir de 2010, notamment grâce aux travaux de la NASA, qui l'applique à la surveillance et à la maintenance prédictive de véhicules spatiaux [1]. L'agence américaine l'emploie pour désigner un modèle multiphysique ultra-fidèle, mis à jour en continu par les données de fonctionnement réelles, afin de prédire les dégradations et d'anticiper les interventions de maintenance. Depuis lors, le concept a connu une expansion rapide vers les domaines de la fabrication, de l'énergie et des infrastructures urbaines, comme en témoignent les travaux de GRIEVES et VICKERS qui formalisent davantage la notion de cycle de vie virtuel du produit [2].

1.1.1.2 Définition académique du jumeau numérique

Dans la littérature académique contemporaine, le jumeau numérique est généralement défini comme une réplique virtuelle d'un système ou d'un produit physique, synchronisée en temps réel ou quasi réel avec son homologue matériel par un flux bidirectionnel de données [3]. TAO et al insistent notamment sur la dimension dynamique du jumeau numérique : contrairement à un simple modèle de simulation statique, il évolue en permanence pour refléter les changements d'état, les dégradations progressives et les modifications de configuration du système réel [3]. Cette capacité d'évolution continue est ce qui distingue fondamentalement le jumeau numérique d'un modèle CAO ou d'un simulateur classique.

D'autres auteurs, comme BOSCHERT et ROSEN, adoptent une perspective orientée ingénierie des systèmes et mettent en avant la capacité du jumeau numérique à servir de support à la prise de décision tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'une installation [4]. Dans cette optique, le jumeau numérique n'est pas un simple outil de visualisation, mais un véritable système d'information opérationnel, capable d'alimenter des diagnostiques, des prédictions et des recommandations d'action. FULLER et al complètent cette vision en proposant une revue exhaustive des applications du jumeau numérique, soulignant l'importance croissante de l'interconnexion entre modèles physiques, données capteurs et algorithmes d'analyse [5].

1.1.1.3 Distinction entre modèle numérique et jumeau numérique

Une confusion fréquente dans la littérature consiste à assimiler le jumeau numérique à tout modèle numérique d'un système physique. KRITZINGER et al ont proposé une taxonomie rigoureuse qui distingue trois niveaux : le digital model (modèle déconnecté), le digital shadow (alimenté en sens unique par le réel) et le digital twin proprement dit, caractérisé par un couplage bidirectionnel [6]. Cette classification est particulièrement utile pour situer les projets selon leur degré réel d'intégration. MADNI et al approfondissent cette distinction en introduisant la notion de niveaux de couplage, allant du modèle purement statique au jumeau numérique adaptatif capable de reconfigurer son comportement en réponse aux évolutions du système physique [7].

1.1.1.4 Évolution vers l'Industrie 4.0

L'essor de l'Industrie 4.0 a considérablement accéléré la diffusion du concept de jumeau numérique, en lui fournissant l'écosystème technologique nécessaire à sa concrétisation à grande échelle. Le déploiement massif de capteurs connectés, la généralisation des bus de terrain standardisés et la montée en puissance des plateformes cloud industrielles ont rendu possible la connexion en temps réel de milliers de machines, permettant d'alimenter des modèles de simulation exploitables à des fins opérationnelles [8]. HERMANN et al analysent les principaux piliers technologiques de l'Industrie 4.0 systèmes cyber-physiques, internet des objets et services cloud et montrent comment leur combinaison crée les conditions nécessaires au déploiement généralisé des jumeaux numériques dans les environnements de production [9]. Aujourd'hui, de grands groupes industriels comme Siemens, General Electric ou Dassault Systèmes ont fait du jumeau numérique une pierre angulaire de leur offre pour les usines du futur.

1.1.2 Les trois composantes fondamentales

1.1.2.1 L'entité physique

L'entité physique désigne le système réel dont on cherche à construire le jumeau numérique. Dans le contexte des systèmes de production automatisés, elle englobe l'ensemble des composants matériels : structures mécaniques, actionneurs, capteurs, réseaux de communication, automates et interfaces homme-machine. Sa caractérisation précise est une étape préalable indispensable au développement du jumeau numérique, car elle conditionne directement la fidélité du modèle virtuel et la pertinence des flux de données échangés [3]. RASHEED et al soulignent que la qualité de l'instrumentation de l'entité physique densité des capteurs, fréquence d'échantillonnage, fiabilité des mesures

est le principal facteur limitant la précision du jumeau numérique en conditions réelles [10].

1.1.2.2 L'entité virtuelle

L'entité virtuelle regroupe l'ensemble des modèles numériques qui représentent l'entité physique à différents niveaux d'abstraction : modèle géométrique 3D, modèle cinématique, modèle dynamique, modèle comportemental de la commande, voire modèles multiphysiques [4]. Dans Siemens NX/MCD, l'entité virtuelle prend la forme d'un assemblage 3D paramétrique enrichi par la définition de corps Rigids, de liaisons mécaniques, d'actionneurs virtuels et de capteurs simulés. SÖDERBERG et al montrent que la richesse de l'entité virtuelle notamment sa capacité à intégrer des modèles de tolérances géométriques et de variations de fabrication détermine directement la valeur ajoutée du jumeau numérique pour la gestion de la qualité en production [11].

1.1.2.3 Le flux de données

Le flux de données constitue le lien vital entre l'entité physique et l'entité virtuelle. Sans ce flux, le modèle numérique reste statique et déconnecté du réel. Dans les architectures de jumeau numérique modernes, ce flux s'appuie sur des protocoles de communication industriels standardisés, des bases de données temps réel et des mécanismes de synchronisation garantissant la cohérence entre les deux mondes [8]. LIU et al analysent les architectures de flux de données pour les jumeaux numériques industriels et identifient les compromis entre latence, bande passante et cohérence des données, en particulier dans les environnements de production à cadence élevée [12]. Dans ce travail, ce flux est assuré par la liaison OPC UA entre TIA Portal/PLCSIM Advanced et Siemens NX/MCD.

1.1.3 Niveaux de maturité

1.1.3.1 Niveau descriptif

Au niveau descriptif, le jumeau numérique offre principalement une visualisation et une reproduction fidèle de l'état courant du système physique, sans capacités avancées d'analyse ni de projection dans le futur. Il permet néanmoins de superviser l'installation à distance, de vérifier la cohérence des états logiques et de détecter visuellement certaines anomalies de fonctionnement. Ce niveau correspond à ce que GRIEVES et VICKERS

qualifient de « miroir numérique », premier stade indispensable avant toute montée en maturité vers des fonctions analytiques plus avancées [2].

1.1.3.2 Niveau diagnostique

Au niveau diagnostique, le jumeau numérique acquiert la capacité d'analyser les causes des dysfonctionnements ou des dérives observées. En exploitant les données historiques et les modèles physiques, il peut identifier les origines probables d'une anomalie et orienter les opérations de maintenance ou de correction [6]. VENKATESAN et al illustrent cette capacité dans le contexte des systèmes mécatroniques complexes, en montrant comment la comparaison entre les signatures de fonctionnement simulées et mesurées permet de localiser précisément les défauts au niveau composant [13].

1.1.3.3 Niveau prédictif

Le niveau prédictif permet de simuler l'évolution future du système et d'anticiper l'apparition de pannes, de goulots d'étranglement ou de dégradations des performances. Il repose sur des modèles de vieillissement, des algorithmes d'apprentissage automatique ou des techniques d'analyse de données avancées, alimentés par l'historique de fonctionnement collecté en continu. ZHUANG et al proposent une architecture de jumeau numérique prédictif pour les systèmes de fabrication, combinant des réseaux de neurones récurrents avec des modèles physiques pour améliorer la précision des prédictions de durée de vie résiduelle des équipements [14].

1.1.3.4 Niveau prescriptif

Le niveau prescriptif représente le degré de maturité le plus élevé. Il ne se contente plus d'analyser ou de prédire, mais cherche à recommander voire à déclencher automatiquement des actions optimales pour corriger ou prévenir les dysfonctionnements. Ce niveau intègre des approches d'optimisation, de décision multicritère ou d'intelligence artificielle [3]. PIRES et al illustrent une telle architecture prescriptive appliquée à la gestion dynamique des flux de production, où le jumeau numérique génère en temps réel des recommandations d'ordonnancement en réponse aux aléas de la ligne [15].

1.1.3.5 Positionnement du projet

Dans le cadre du présent mémoire, le jumeau numérique développé pour la station Distribution du FESTO MPS 500 se positionne principalement au niveau descriptif, avec

certaines fonctionnalités de diagnostic fonctionnel. La co-simulation permet de reproduire les séquences de fonctionnement et de vérifier la cohérence entre la logique de commande et le comportement attendu. L'extension vers des niveaux de maturité prédictifs ou prescriptifs constitue une perspective à envisager dans des travaux ultérieurs.

1.1.4 Applications industrielles et revue de la littérature

1.1.4.1 Industrie manufacturière

Les applications industrielles du jumeau numérique sont aujourd'hui nombreuses et couvrent un large spectre de secteurs. Dans l'industrie manufacturière, les jumeaux numériques sont utilisés pour concevoir et valider des lignes de production, optimiser les flux de matières, configurer des systèmes flexibles et réduire le temps de mise en service. TAO et al ont mis en évidence le rôle central du jumeau numérique dans l'optimisation des systèmes de fabrication intelligents, en particulier pour la surveillance en temps réel, la prédiction des pannes et la gestion de la qualité [3]. SCHROEDER et al ont quant à eux proposé une architecture de jumeau numérique pour ateliers de fabrication flexible, démontrant une réduction significative du temps de reconfiguration des lignes grâce à la simulation préalable des séquences de production [16].

1.1.4.2 Maintenance prédictive

La maintenance prédictive est sans doute le domaine d'application le plus mature du jumeau numérique à ce jour. En combinant les données de fonctionnement collectées en temps réel avec des modèles physiques ou statistiques de dégradation, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle des composants critiques et de planifier les interventions de manière proactive [8]. Cette approche permet de réduire significativement les arrêts non planifiés et les coûts de maintenance. AIVALIOTIS et al ont développé un cadre de maintenance prédictive basé sur le jumeau numérique pour les robots industriels, montrant qu'une intégration étroite entre le modèle cinématique et les données vibratoires permet de détecter les dégradations des réducteurs bien avant l'apparition de défaillances manifestes [17].

1.1.4.3 Virtual Commissioning

Dans le domaine spécifique du virtual commissioning, de nombreux auteurs rapportent l'intérêt de coupler des modèles mécatroniques détaillées avec des programmes automates afin de tester, valider et optimiser la logique de commande avant la mise en

service réelle [18]. L'utilisation de Siemens NX/MCD en combinaison avec TIA Portal et PLCSIM Advanced apparaît comme une solution particulièrement adaptée pour les systèmes pilotés par des automates Siemens. KAZMI décrit notamment une méthodologie de validation d'un jumeau mécatronique de la MPS 500, en comparant les résultats de co-simulation aux données mesurées sur l'installation réelle [19]. OPPELT et al analysent plus largement les bénéfices industriels du virtual commissioning, quantifiant une réduction moyenne de 30 % des délais de mise en service dans des projets d'automatisation industrielle complexes [20].

1.1.4.4 Synthèse des travaux existants

En synthèse, la littérature récente confirme que le jumeau numérique est devenu un outil incontournable pour la conception, la validation et l'exploitation des systèmes de production modernes. Le cas particulier de la station Distribution du FESTO MPS 500 s'inscrit pleinement dans cette dynamique, en combinant un système physique représentatif des problématiques industrielles et un ensemble d'outils logiciels avancés permettant de réaliser un jumeau numérique opérationnel. NEGRI et al proposent une revue systématique de la littérature sur les jumeaux numériques en fabrication, qui confirme la convergence des approches vers une intégration plus étroite entre simulation physique, communication temps réel et intelligence artificielle [21].

1.2 Présentation de la Station Distribution du FESTO MPS 500

1.2.1 Architecture générale du système MPS 500

1.2.1.1 Structure modulaire

Le système FESTO MPS 500 (Modular Production System) est une plateforme didactique modulaire destinée à l'enseignement et à la recherche en automatisme industriel. Il reproduit à échelle réduite les principaux processus d'une ligne de fabrication automatisée, en regroupant plusieurs stations spécialisées interconnectées par un système de transport et pilotées par une architecture de commande commune. La modularité du MPS 500 est l'une de ses caractéristiques les plus importantes : chaque station peut fonctionner de manière autonome ou être intégrée dans une configuration plus complexe, ce qui permet d'adapter le système aux objectifs pédagogiques ou expérimentaux visés. Cette conception modulaire reflète les principes des systèmes de fabrication flexibles

(FMS) tels que décrits par MEHRABI et al, qui soulignent l'importance de la reconfigurabilité dans les environnements de production modernes [22].

1.2.1.2 Description des stations principales

Le MPS 500 comprend généralement les stations suivantes : distribution (alimentation en pièces brutes), test (contrôle de qualité), assemblage (insertion de composants), tri (orientation selon les caractéristiques des pièces) et stockage. Chacune de ces stations met en œuvre des technologies industrielles représentatives : actionneurs pneumatiques, convoyeurs électriques, capteurs inductifs et capacitifs, interfaces de communication et automates programmables. La station Distribution occupe une position stratégique en tête de ligne : elle assure l'alimentation en pièces de l'ensemble du système et conditionne directement le rythme de production de toutes les stations en aval.

1.2.1.3 Architecture de commande et communication

Sur le plan de la commande, les stations du MPS 500 sont généralement pilotées par des automates programmables industriels de la gamme Siemens (S7-300, S7-400, S7-1200, S7-1500 ou ET200SP), associés à des modules d'entrées/sorties déportés et à des réseaux de communication industriels. Les différentes stations peuvent être interconnectées via des bus de terrain standardisés (PROFINET, PROFIBUS), ce qui facilite leur intégration dans des architectures de commande distribuées et leur couplage avec des systèmes de supervision ou des plateformes de jumeau numérique. Cette architecture s'inscrit dans le cadre des systèmes cyber-physiques de production décrits par MONOSTORI et al., où l'intégration verticale entre terrain et supervision est un facteur clé de la flexibilité industrielle [23].

1.2.2 Description détaillée de la station Distribution

1.2.2.1 Partie mécanique : magasin, vérins et guidages

La station Distribution a pour fonction principale d'alimenter la ligne en pièces brutes généralement des cylindres de couleurs différentes en assurant leur séparation unitaire et leur mise à disposition vers la station suivante. Sur le plan mécanique, elle s'articule autour d'un magasin vertical dans lequel les pièces sont empilées par gravité, d'un mécanisme de séparation qui isole la pièce du bas de la pile, et d'un ou plusieurs vérins de poussée qui assurent le transfert vers la zone de départ du convoyeur.

Les guidages linéaires garantissent la précision des mouvements des chariots et des éléments mobiles, tandis que des butées mécaniques définissent les positions extrêmes de chaque axe. La structure de la station est réalisée en profilés aluminium, qui offrent une grande flexibilité de montage et facilitent la modélisation dans un environnement CAO comme Siemens NX. Ce type de conception mécanique est bien documenté dans la littérature sur la conception modulaire des systèmes d'alimentation automatisés [22].

1.2.2.2 Partie pneumatique : électrovannes et unité de traitement d'air

Le sous-système pneumatique constitue le moteur principal de la station Distribution. Il comprend une unité de traitement d'air (filtre, régulateur de pression, lubrificateur) qui conditionne l'air comprimé avant sa distribution aux différents actionneurs, un réseau de canalisations et de raccords rapides, des distributeurs électropneumatiques (généralement 5/2 ou 5/3 voies) commandés par les sorties de l'automate, et des vérins à simple ou double effet dont les mouvements sont régulés par des régulateurs de débit et des amortisseurs de fin de course. La modélisation précise du comportement pneumatique dans un environnement de simulation mécatronique constitue un enjeu important pour la fidélité du jumeau numérique, comme le soulignent ANTICIPIC et al dans leurs travaux sur la co-simulation des systèmes pneumatiques [24].

1.2.2.3 Partie électrique : capteurs, API et modules E/S

Sur le plan électrique, la station intègre un coffret de connexion regroupant les borniers d'entrées/sorties, les alimentations 24 V DC et les dispositifs de protection. L'automate programmable Siemens traite les signaux des capteurs et génère les commandes vers les actionneurs, selon un programme développé dans TIA Portal. Les câblages sont organisés de manière à identifier clairement chaque signal, ce qui facilite le mappage entre les variables du programme automate et les signaux du modèle virtuel dans NX/MCD. La cohérence entre le schéma électrique réel et le modèle de signaux du jumeau numérique est un facteur déterminant de la qualité du virtual commissioning, comme le montrent HOFFMANN et al dans leur étude comparative de méthodologies de mise en service virtuelle [18].

1.2.3 Fonctionnement séquentiel

1.2.3.1 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle de la station Distribution révèle une organisation séquentielle claire, dans laquelle chaque étape est conditionnée par la validation d'une ou plusieurs conditions issues des capteurs. La station réalise essentiellement trois fonctions : stocker un stock tampon de pièces brutes, séparer et isoler une pièce à la demande, et transférer cette pièce vers la station aval ou le convoyeur de transport. Cette décomposition fonctionnelle est conforme à la méthode GRAFCET, standardisée par la norme IEC 60848, qui constitue l'outil de référence pour la description des automatismes séquentiels dans l'enseignement et l'industrie francophones.

1.2.3.2 Description du cycle automatique

En mode automatique, le cycle de la station peut être résumé de la manière suivante : la présence d'une pièce dans le magasin est détectée par un capteur dédié ; sur ordre du système de commande, le mécanisme de séparation libère la pièce du bas ; le vérin de poussée s'étend pour transférer la pièce vers la zone de départ ; des capteurs confirmant la bonne position, le vérin se rétracte et la station est prête pour un nouveau cycle. La fidélité de reproduction de ce cycle dans le jumeau numérique constitue le principal critère de validation de la co-simulation, conformément à la méthodologie décrite par OPPELT et al [20].

1.2.3.3 Modes de fonctionnement

La station dispose généralement de plusieurs modes de fonctionnement : mode manuel (commande directe de chaque actionneur depuis l'IHM), mode pas à pas (exécution séquentielle étape par étape), mode automatique (cycle continu en attente de demandes) et mode réinitialisation (retour à l'état initial). La gestion de ces modes est implémentée dans le programme automate et doit être fidèlement reproduite dans le jumeau numérique pour permettre une validation complète. FALLER et FELDMÜLLER insistent sur l'importance de tester l'intégralité des modes opératoires dans le cadre du virtual commissioning, afin de garantir une couverture de validation suffisante avant la mise en service réelle [25].

1.2.3.4 Gestion des défauts

La gestion des défauts constitue un aspect important du programme de commande. Les principaux défauts pris en compte incluent l'absence de pièce dans le magasin, le non-

retour d'un vérin dans les délais impartis et la détection d'une pièce mal positionnée. Dans chaque cas, l'automate met en œuvre une stratégie de signalisation, de repli ou d'arrêt contrôlé, afin de préserver la sécurité de l'installation. La vérification du comportement en mode dégradé dans l'environnement de simulation est une exigence croissante dans les projets de virtual commissioning industriels, comme le soulignent HOFFMANN et al [18].

1.2.4 Capteurs, actionneurs et interfaces

1.2.4.1 Typologie des capteurs

La station Distribution est équipée d'une variété de capteurs adaptés aux différentes fonctions de détection requises : détecteurs inductifs pour la détection des pièces métalliques et des positions de vérins, capteurs capacitifs pour les pièces en plastique, détecteurs optiques (barrières ou fourches) pour la détection de passages, et capteurs magnétiques (ILS) montés sur les vérins pour signaler les fins de course. Tous ces capteurs délivrent des signaux discrets (tout ou rien, 0 ou 24 V) aux entrées de l'automate. La modélisation des comportements de ces capteurs dans l'environnement virtuel est une étape essentielle pour garantir la cohérence du jumeau numérique avec le système réel, comme le décrivent SCHROEDER et al dans leur méthodologie de construction de modèles mécatroniques [16].

1.2.4.2 Typologie des actionneurs

Les actionneurs principaux sont les vérins pneumatiques à simple ou double effet, commandés par les distributeurs électropneumatiques. En complément, la station peut comporter un motoréducteur pour l'entraînement du convoyeur de sortie, commandé par une sortie de l'automate via un relais ou un contacteur. Dans le modèle mécatronique NX/MCD, ces actionneurs sont représentés par des objets de simulation dont les signaux d'entrée sont mappés vers les sorties correspondantes du programme automate. La précision de ce mappage conditionne directement la fidélité comportementale du jumeau numérique en co-simulation [19].

1.2.4.3 Architecture des entrées/sorties

L'architecture des E/S de la station s'appuie sur un module compact intégré dans l'automate ou sur des modules déportés connectés via PROFINET. Le tableau des E/S, qui associe chaque signal physique à une adresse mémoire dans le programme automate,

constitue un document de référence essentiel pour la configuration du jumeau numérique et le mappage des signaux entre NX/MCD et TIA Portal. MONOSTORI et al soulignent que la standardisation de l'architecture des E/S est un facteur clé pour faciliter l'interopérabilité entre les équipements de terrain et les plateformes de jumeau numérique dans les environnements multifournisseurs [23].

1.2.4.4 Interfaces réseau industrielles

La station Distribution peut être connectée aux autres stations du MPS 500 et à des systèmes de supervision via des interfaces réseau standardisées (PROFINET, Ethernet industriel). Cette connectivité est un prérequis pour l'intégration dans un jumeau numérique étendu, susceptible de couvrir l'ensemble de la ligne de production. L'adoption de protocoles ouverts comme OPC UA au niveau du réseau de terrain facilite considérablement cette intégration, en permettant une communication normalisée entre équipements hétérogènes, comme le montrent CAVALIERI et SALAFIA dans leur analyse de l'apport d'OPC UA aux architectures de jumeau numérique industriel [26].

1.3 Outils Technologiques Utilisés

1.3.1 Siemens NX

1.3.1.1 Environnement CAO

Siemens NX est l'une des solutions logicielles les plus complètes et les plus répandues dans l'industrie pour la conception assistée par ordinateur. Il intègre des fonctionnalités avancées de modélisation paramétrique, d'assemblage, de mise en plan et de gestion des données de conception, permettant de gérer des produits d'une grande complexité. Sa large adoption dans les secteurs automobile, aéronautique et de l'automatisation industrielle en fait un outil de référence pour les ingénieurs impliqués dans la conception et la simulation de systèmes mécatroniques. SÖDERBERG et al mentionnent NX parmi les environnements CAO les mieux adaptés à l'intégration de la simulation de variations géométriques dans le cycle de développement produit [11].

1.3.1.2 Simulation cinématique

Les modules de simulation cinématique de NX permettent d'animer les assemblages 3D en définissant des liaisons entre les composants et en appliquant des lois

de mouvement paramétrables. Cette fonctionnalité est utilisée pour vérifier les courses des actionneurs, détecter les interférences géométriques et valider la cohérence des mouvements avant de passer à la configuration plus avancée du module MCD. La vérification cinématique préalable constitue une bonne pratique documentée dans les méthodologies de virtual commissioning, car elle permet d'identifier les incohérences géométriques du modèle CAO avant d'y intégrer la logique de commande [20].

1.3.1.3 Module Mechatronics Concept Designer (MCD)

Le module MCD représente l'environnement clé pour le développement du jumeau numérique dans ce mémoire. Il permet de passer d'un modèle CAO 3D statique à un modèle mécatronique dynamique, en intégrant les propriétés physiques des composants (masse, inertie, frottement), les liaisons mécaniques avec leurs degrés de liberté, les actionneurs et capteurs virtuels, ainsi que les signaux d'E/S permettant le couplage avec un système de commande externe. MCD offre également des fonctionnalités de simulation physique (contacts, gravité) qui enrichissent la fidélité du modèle [6]. SCHROEDER et al confirment que l'environnement MCD est particulièrement adapté au virtual commissioning de systèmes d'automatisation pilotés par automates Siemens, grâce à son intégration native avec les outils TIA Portal et PLCSIM [16].

1.3.1.4 Avantages pour le Virtual Commissioning

L'utilisation de NX/MCD pour le virtual commissioning présente plusieurs avantages déterminants : la continuité avec le modèle CAO sans nouvelle modélisation, l'intégration native des interfaces de communication avec les automates Siemens, la richesse des fonctionnalités de simulation physique et la possibilité de documenter et d'archiver le modèle de simulation comme partie intégrante du dossier de conception. FALLER et FELDMÜLLER soulignent que cette continuité numérique entre la conception et la mise en service constitue un facteur décisif pour la réduction des délais de projet dans les environnements industriels où la pression temporelle est forte [25].

1.3.2 TIA Portal

1.3.2.1 Architecture logicielle

Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) est la plateforme d'ingénierie unifiée de Siemens, qui regroupe dans un environnement commun tous les outils nécessaires à la configuration, à la programmation, à la mise en service et au diagnostic des équipements d'automatisation Siemens : automates S7-1200, S7-1500, ET200SP, variateurs de vitesse, IHM et réseaux industriels. Sa conception modulaire et son interface intuitive en font un outil incontournable dans les laboratoires d'automatisme. L'environnement TIA Portal s'inscrit dans la vision d'ingénierie intégrée promue par Siemens dans le cadre de son offre Digital Enterprise, visant une continuité de données entre la conception, la simulation et l'exploitation [9].

1.3.2.2 Programmation API

TIA Portal supporte l'ensemble des langages de programmation normalisés par la norme IEC 61131-3 : Ladder Diagram (LAD), Function Block Diagram (FBD), Structured Control Language (SCL) et Sequential Function Chart (SFC). Dans le cadre de ce mémoire, le programme de commande de la station Distribution est développé en LAD ou en SFC, en s'appuyant sur une analyse GRAFCET préalable pour formaliser la logique séquentielle. La conformité à la norme IEC 61131-3 garantit la portabilité des blocs fonctionnels développés entre différentes générations d'automates Siemens et facilite la maintenance à long terme du programme de commande.

1.3.2.3 Simulation avec PLCSIM Advanced

PLCSIM Advanced est un émulateur logiciel qui reproduit fidèlement le comportement d'un automate S7-1500 ou ET200SP, en exposant ses interfaces de communication (PROFINET, OPC UA) comme si l'automate était physiquement présent sur le réseau. Cette fonctionnalité est au cœur du virtual commissioning : elle permet de tester le programme automate en interaction avec un modèle virtuel du procédé, sans avoir besoin ni de l'automate physique ni de l'installation réelle [3]. OPPELT et al ont évalué les performances de PLCSIM Advanced dans des scénarios de virtual commissioning industriels et concluent que la fidélité temporelle de l'émulation est suffisante pour valider des programmes de commande de systèmes à dynamique modérée, comme les stations de manutention et d'assemblage [20].

1.3.2.4 Diagnostic et supervision

TIA Portal intègre également des outils de diagnostic avancés permettant de surveiller en temps réel l'état des variables du programme, de tracer l'exécution des blocs

fonctionnels et d'identifier rapidement les sources d'erreurs. Ces fonctionnalités sont particulièrement utiles lors de la phase de co-simulation, pour détecter les incohérences entre la logique de commande et le comportement du modèle virtuel. La traçabilité offerte par ces outils de diagnostic contribue également à la documentation du processus de validation, une exigence croissante dans les projets industriels soumis à des normes de sécurité fonctionnelle [25].

1.3.3 Protocoles de communication

1.3.3.1 Présentation d'OPC UA

OPC Unified Architecture (OPC UA) est un standard de communication orienté services, publié et maintenu par l'OPC Foundation, et largement adopté dans les environnements industriels pour l'échange de données entre équipements hétérogènes. Contrairement à ses prédécesseurs (OPC DA, OPC HDA), OPC UA ne dépend pas de la technologie COM/DCOM de Microsoft et peut donc être déployé sur n'importe quelle plateforme matérielle et logicielle, ce qui en fait une solution véritablement interopérable et adaptée à l'Industrie 4.0 [8]. LANGE et al analysent en détail l'architecture sémantique d'OPC UA et montrent comment ses modèles d'information extensibles permettent de représenter non seulement des variables de procédé, mais aussi des structures d'équipements complexes conformément aux normes IEC et ISA [27].

1.3.3.2 Architecture client–serveur

OPC UA repose sur une architecture client-serveur dans laquelle un serveur expose un espace d'adressage structuré (nœuds, variables, objets, méthodes) et un ou plusieurs clients viennent lire, écrire ou s'abonner à ces données. Dans l'architecture du jumeau numérique développé dans ce mémoire, PLCSIM Advanced joue le rôle de serveur OPC UA en exposant les variables du programme automate, tandis que Siemens NX/MCD agit comme client en s'abonnant aux signaux pertinents et en mettant à jour ses actionneurs et capteurs virtuels en conséquence. CAVALIERI et SALAFIA ont étudié les performances de cette architecture dans des contextes de co-simulation, et montrent que les délais de communication OPC UA sont compatibles avec les exigences temps réel des applications de virtual commissioning à dynamique modérée [26].

1.3.3.3 Sécurisation des échanges

OPC UA intègre des mécanismes natifs de sécurité : authentification des utilisateurs, chiffrement des communications (TLS), intégrité des messages et journalisation des accès. Ces caractéristiques en font une solution adaptée non seulement aux environnements de laboratoire, mais aussi aux déploiements industriels où la sécurité des données et la protection contre les intrusions sont des exigences impératives. LANGE et al soulignent que le modèle de sécurité multicouches d'OPC UA est l'un des facteurs ayant conduit à son adoption massive dans les architectures d'automatisation industrielle conformes aux normes IEC 62443 sur la cybersécurité des systèmes de contrôle [27].

1.3.3.4 Intégration NX – TIA Portal

Dans le contexte du présent mémoire, la liaison OPC UA entre NX/MCD et PLCSIM Advanced est configurée via des tables de signaux définies dans NX, qui associent chaque actionneur ou capteur virtuel à une variable OPC UA du serveur PLCSIM. Cette configuration permet de réaliser une co-simulation en boucle fermée : les sorties de l'automate commandent les actionneurs du modèle virtuel, et les états des capteurs simulés sont renvoyés comme entrées vers le programme automate, reproduisant ainsi fidèlement le comportement du système réel. Cette approche de co-simulation en boucle fermée est désormais considérée comme la référence méthodologique pour le virtual commissioning des systèmes d'automatisation modernes, comme le confirment SCHROEDER et al dans leur cadre de référence pour la mise en service virtuelle [16].

CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis d'établir le cadre conceptuel et technologique du jumeau numérique développé dans ce mémoire. Après avoir retracé l'évolution historique du concept, défini ses composantes fondamentales et ses niveaux de maturité, nous avons présenté la station distribution du FESTO MPS 500 dans sa globalité, aspects mécaniques, pneumatiques, électriques et séquentiels, avant de décrire les outils logiciels mobilisés : Siemens NX/MCD, TIA Portal/PLCSIM Advanced et le protocole OPC UA.

Ces éléments constituent le socle sur lequel repose l'ensemble du travail présenté dans les chapitres suivants. Le Chapitre 2 se consacrera à la modélisation CAO 3D et à la configuration de la simulation mécatronique dans NX/MCD, tandis que le Chapitre 3

traitera de la programmation automate avec TIA Portal et la validation globale du jumeau numérique.

CHAPITRE II

Modélisation et Développement du Jumeau Numérique sous Siemens NX

INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre s'inscrit dans la continuité logique du premier, et en constitue le prolongement naturel vers le terrain de l'action. Si le chapitre précédent nous a permis de comprendre pourquoi le jumeau numérique est une approche pertinente et quel système nous avons choisi de modéliser, il reste maintenant à répondre à la question fondamentale : comment construit-on concrètement ce jumeau ? C'est à cette question que le présent chapitre apporte une réponse méthodique, étape par étape, outil par outil.

Il est utile de rappeler, à l'entrée de ce chapitre, que la construction d'un jumeau numérique dans un environnement industriel comme Siemens NX ne se réduit pas à une suite d'opérations logicielles. Elle engage une réflexion d'ingénieur : comprendre les degrés de liberté d'un mécanisme avant de définir ses liaisons, anticiper les interactions physiques entre composants avant de paramétrer les corps de collision, choisir le bon type de capteur virtuel en fonction du rôle fonctionnel du capteur réel. Chaque décision prise dans cet environnement numérique a une traduction directe sur la qualité et la crédibilité de la simulation finale.

Après avoir exploré les fondements théoriques du jumeau numérique et analysé la station Distribution du FESTO MPS 500, nous entrons maintenant dans la phase pratique du projet. Ce chapitre représente le passage de la conception à la réalisation concrète.

Notre objectif principal ici consiste à transformer la station physique en un modèle virtuel fonctionnel. Il ne s'agit pas simplement de reproduire l'apparence extérieure de l'équipement, mais bien de créer une réplique capable de simuler les mouvements réels et les interactions entre composants.

Le travail s'organise en deux grandes étapes après l’importation du fichier. Nous configurons les aspects mécatroniques dans l'environnement MCD de Siemens NX : définition des corps mobiles, liaisons cinématiques, actionneurs et capteurs, puis nous validons le comportement du modèle en vérifiant que ses mouvements correspondent bien à ceux observés sur l'installation réelle.

Un défi important réside dans le compromis entre précision et performance. Modéliser chaque petit détail donnerait un résultat très réaliste mais impraticable pour une simulation fluide. Nous avons donc retenu uniquement les composants essentiels au fonctionnement global, en simplifiant les éléments secondaires.

Cette approche s'inscrit dans la logique du Virtual Commissioning. Le modèle développé doit permettre de tester le programme automate sans risquer d'endommager le matériel réel.

Les sections suivantes présentent notre démarche de façon chronologique : importation des fichiers 3D, restructuration pour la simulation, puis configuration progressive jusqu'à obtenir un système mécatronique pleinement opérationnel. Ce modèle servira de base pour l'intégration avec TIA Portal qui sera traitée au chapitre suivant.

2.1 Modélisation CAO 3D

La première étape concrète dans l'élaboration du jumeau numérique consiste à recréer fidèlement la géométrie tridimensionnelle de la station Distribution. Cette phase constitue le socle sur lequel reposera l'ensemble de la simulation mécatronique.

Avant d'entrer dans le détail des opérations effectuées, il convient de situer cette phase dans son contexte méthodologique global. La modélisation CAO 3D orientée simulation obéit à une logique différente de celle orientée fabrication. Dans le cadre d'une conception pour la production, l'ingénieur cherche à représenter chaque détail géométrique avec une fidélité absolue, car ces détails conditionnent directement les processus d'usinage et d'assemblage. Dans notre contexte de simulation comportementale, la priorité est accordée à la cohérence fonctionnelle : il s'agit de garantir que les relations spatiales entre composants, les degrés de liberté des liaisons, et les zones d'interaction physique reflètent correctement la réalité, sans nécessairement reproduire chaque petite pièce dans son moindre détail. Ce choix délibéré de simplification raisonnée est une marque de maturité méthodologique, non une limite du travail accompli.

2.1.1 Acquisition du modèle géométrique initial

Dans le cadre de notre projet, notre équipe pédagogique nous a fourni un fichier source au format .vrl (Virtual Reality Language), exporté depuis le logiciel Ceros développé par Festo. Ce fichier contenait une représentation virtuelle préexistante de la station, conçue initialement à des fins de visualisation et de formation.

Le format .vrl est un format propriétaire utilisé par Festo pour la représentation 3D interactive de leurs équipements didactiques. Bien qu'il permette une visualisation réaliste, ce format n'est pas directement exploitable dans NX pour une simulation

physique avancée. Il a donc fallu procéder à une importation et conversion de ce modèle dans l'environnement Siemens NX.

2.1.2 Processus d'importation dans Siemens NX

L'importation du fichier .vrl dans NX s'est effectuée via les modules de conversion de formats. Une fois importé, le modèle se présentait sous forme d'un assemblage de surfaces ou de solides basiques, mais sans les propriétés mécaniques ni les relations d'assemblage nécessaires pour la simulation.

À ce stade, le modèle importé servait principalement de référence visuelle et dimensionnelle. Il nous permettait de :

- Visualiser l'architecture globale de la station
- Identifier les différents composants mécaniques
- Relever approximativement les dimensions principales
- Comprendre les liaisons cinématiques entre éléments

Mesures de quelques pièces clés :

Nom de composant	Dimensions en mm
Tube de magazine	D 51 x Long 215,8
Magazine	Long 281,2 x Larg 107,5
Vérin SS-1	Long 123,5
Bras pivotant	Long 207,2
Vérin SS-2	Long 134,4
Stock SS-2	Long 205
Pièce	D 40 x Haut 25,23

1-Tableau 2.1 : Dimensions des composants principaux

Ces mesures ne représentent pas uniquement des données brutes à insérer dans un tableau : elles constituent le lien de vérité entre la station physique et son jumeau numérique. Toute erreur dimensionnelle à ce stade se répercuterait en cascade sur l'ensemble des étapes suivantes liaisons mal positionnées, capteurs déclenchés à de mauvaises positions, voire interférences géométriques faussant la simulation. C'est

pourquoi chaque mesure a été effectuée avec soin, en vérifiant systématiquement la cohérence entre les valeurs obtenues et la logique mécanique générale de la station.

Les mesures ont été effectuées en utilisant **Analysis>Measure :**

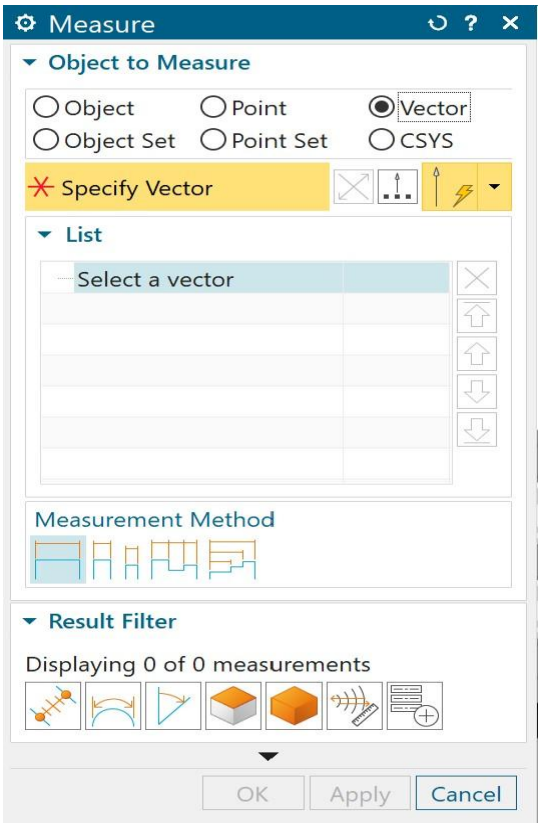
Cliquez sur « Object », puis sélectionnez l'objet à mesurer.

Cliquez ensuite sur « Object Set », puis sélectionnez le même objet que celui choisi précédemment.

Cliquez ensuite sur « Vector » puis sélectionnez la direction de mesure.

Pour le « Measurement Method » nous avons choisi la première à gauche.

Enfin dans « Result Filter » nous avons choisi la première à gauche aussi.



1-Figure 2.1 : Paramètres de mesure

2.1.4 Passage au module Mechatronics Concept Designer

Une fois le modèle CAO restructuré et validé, nous avons basculé vers le module MCD de Siemens NX, qui constitue l'environnement dédié à la simulation mécatronique.

Ce passage vers MCD représente également un changement de paradigme dans la manière dont on appréhende le système. Dans l'environnement CAO classique, le concepteur pense en termes de géométrie et de contraintes d'assemblage. Dans MCD, il doit penser en termes de comportements dynamiques, de signaux, et d'interactions entre corps en mouvement. Cette transition mentale, qui peut sembler abrupte au premier abord, devient naturelle dès lors que l'on comprend que MCD ne fait qu'étendre la description du système dans une nouvelle dimension : la dimension du temps et du mouvement.

2.2 Configuration de la Simulation dans le Module MCD (Mechatronics Concept Designer)

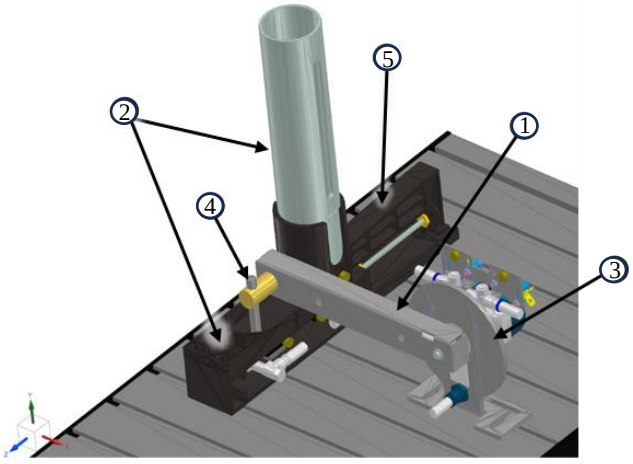
2.2.1 Définition des corps

2.2.1.1 Rigid Bodies

La première étape de la configuration MCD consiste à définir les corps Rigids du modèle dans « Physics Navigator ». Un corps Rigid est un composant ou un ensemble de composants qui se déplace comme un tout indéformable. Chaque corps Rigid possède des propriétés physiques (masse, moment d'inertie, centre de gravité) qui sont calculées automatiquement par NX à partir de la géométrie. Les corps Rigids définis pour la station Distribution sont :

Sous-station 1 :

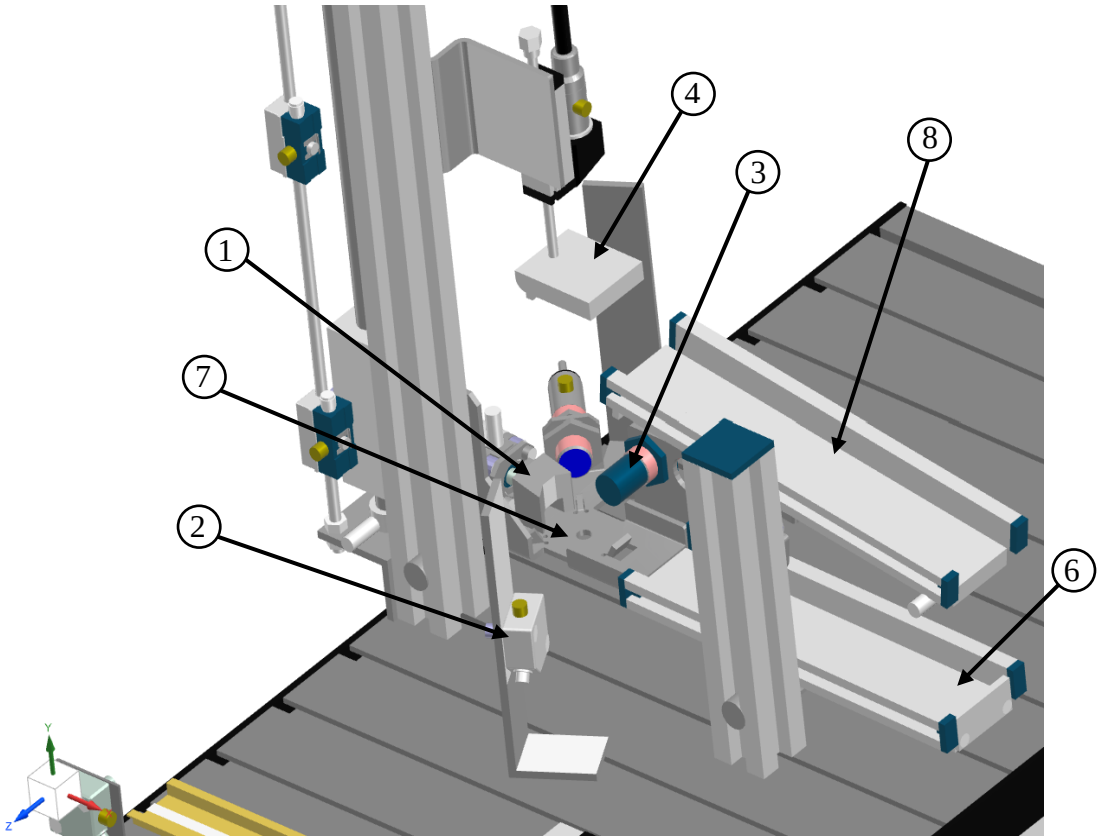
1. Bras pivotant : Le bras de transfert
2. Magazine
3. Porte de Bras
4. Ventouse : Aspiration/relâchement des pièces
5. Vérin d'éjection
6. Pièce blanche
7. Pièce noire
8. Pièce rouge
9. Bouton RESET
10. Voyant RESET
11. Bouton START
12. Voyant START
13. Bouton STOP
14. Indicateur de pression
15. Table (le reste de la sous-station)



2-Figure 2.2 : Quelques corps rigides de la première sous-station

Sous-station 2:

1. Vérin d'éjection
2. Capteur photoélectrique
3. Capteur de proximité
4. Capteur de longueur
5. Indicateur de pression
6. Stock
7. Transporteur (Le capteur qui y est fixé comprend)
8. Plan incliné
9. Bouton RESET
10. Voyant RESET
11. Bouton START
12. Voyant START
13. Bouton STOP
14. Table (le reste de la sous-station)



3-Figure 2.3 : Quelques corps rigides de la deuxième sous-station

Il est important de souligner que la définition de ces corps Rigids a nécessité une analyse préalable du schéma cinématique de la station. Le découpage du système en corps Rigids

distincts doit refléter fidèlement les frontières mécaniques réelles : deux composants qui se déplacent toujours ensemble peuvent être regroupés en un seul corps Rigid, ce qui allège le modèle sans affecter sa pertinence. À l'inverse, deux composants entre lesquels existe un mouvement relatif doivent impérativement être définis comme des corps distincts et reliés par une liaison cinématique appropriée. C'est ce principe de partitionnement fonctionnel qui a guidé l'ensemble de nos choix dans cette section.

2.2.1.2 Collision Bodies

Les corps de collision (Collision Bodies) définissent les enveloppes géométriques utilisée pour la détection des contacts entre les corps Rigids. Le MCD offre plusieurs types de corps de collision : Box, Sphere, Cylinder, Capsule, Convex, Multi Convex, Hole, Mesh, User definded convex.

Mais dans notre cas, nous n'utiliserons que la forme cylindrique et Mesh.

Nom du corps de collision	**Cylindre**	**Mesh**
Capteur de longueur (SS-2)		✓
Plan incliné (SS-2)		✓
Transporteur (SS-2)		✓
Vérin d'éjection (SS-1)		✓
Vérin d'éjection (SS-2)		✓
Tube de Magazine (SS-1)		✓
Magazine (SS-1)		✓
Pièce Blanche	✓	
Pièce Rouge	✓	
Pièce Noir	✓	
Ventouse (SS-1)	✓	

2-Tableau 2.2 : Types de corps de collision dans le système

Le recours exclusif aux formes cylindrique et Mesh dans notre modèle traduit une stratégie de modélisation délibérément pragmatique. La forme cylindrique offre un excellent compromis pour les composants à section circulaire : elle est calculée rapidement par le moteur physique et approxime fidèlement la géométrie réelle des pièces transportées et du tube du magazine. La forme Mesh a été réservée aux éléments dont la géométrie ne peut être correctement encadrée par une primitive simple le plan incliné et le transporteur notamment acceptant ainsi un coût computationnel plus élevé en échange d'une représentation plus fidèle des surfaces de contact.

2.2.2 Modélisation des liaisons

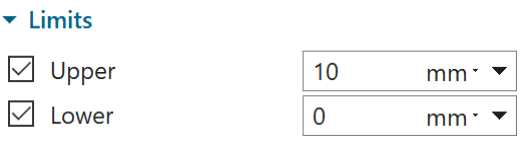
2.2.2.1 Glissières

Les liaisons glissières (Sliding Joint dans MCD) modélisent les mouvements linéaires des différentes pièces de notre système. Cela inclut de préciser le corps sur lequel le mouvement aura lieu et de déterminer la direction du mouvement.

Quant aux dimensions du mouvement, elles seront renseignées ultérieurement.

Vérin d'éjection (SS-1) ⟶ Magazine (SS-1)
Vérin d'éjection (SS-2) ⟶ Transporteur (SS-2)
Transporteur (SS-2) ⟶ Table (SS-2)
Capt.de longueur (SS-2) ⟶ Table (SS-2)
Bouton RESET (SS-1) ⟶ Table (SS-1)
Bouton START (SS-1) ⟶ Table (SS-1)
Bouton STOP (SS-1) ⟶ Table (SS-1)
Bouton RESET (SS-2) ⟶ Table (SS-2)
Bouton START (SS-2) ⟶ Table (SS-2)
Bouton STOP (SS-2) ⟶ Table (SS-2)

Mais dans la capture de longueur, les limites maximales et minimales doivent être saisies



4-Figure 2.4 : limites de mouvement du capteur

Du point de vue de la dynamique des mécanismes, les liaisons glissières de notre station fonctionnent toutes selon un mode de déplacement discret : chaque vérin ou actionneur linéaire ne connaît que deux états stables rentré ou sorti sans position intermédiaire dans le cycle normal de fonctionnement. Cela simplifie considérablement la logique de commande, mais impose une rigueur particulière dans la définition des limites de déplacement : des valeurs incorrectes entraîneraient soit une course insuffisante la pièce n'est pas correctement éjectée soit une course excessive provoquant une interférence géométrique avec un composant adjacent.

Après avoir saisi les corps en collision, essayez de simuler **Home>Play**. Si les objets se déplacent dans une direction de gravité indésirable, vous pouvez modifier ce comportement dans **Home>Mecatronics concept designer preferences**, et ajuster **Acceleration due to gravity** en fonction des axes de votre système.

2.2.2.2 Pivots

Une liaison pivot (Hinge Joint dans MCD) est définie sur l'axe de rotation du l'objet.

Dans notre système on a 4 liaisons pivots :

- Bras pivotant (SS-1) avec porte de bras (SS-1) une base, rotation de SW (shortest way).
- Ventouse (SS-1) avec bras pivotant (SS-1) une base, rotation de SW (shortest way).
- Indicateur de pression (SS-1) avec Table (SS-1) une base.
- Indicateur de pression (SS-2) avec Table (SS-2) une base.

La particularité des deux liaisons pivots associées à la ventouse et au bras mérite une attention spéciale. La ventouse étant solidaire du bras pivotant, elle tourne avec lui lors de son déplacement entre la position magazine et la position de dépose. Cependant, pour que la ventouse maintienne une orientation correcte par rapport à la pièce qu'elle saisit, il est nécessaire que sa rotation propre soit inverse à celle du bras. Ce couplage cinématique inversé, implémenté via la liaison pivot avec rotation SW en sens contraire, reproduit fidèlement le mécanisme de compensation angulaire que l'on observe sur la station réelle.

2.2.2.3 Fixés

La fixation est très nécessaire pour éviter que les pièces ne subissent la gravité si elles n'ont pas de mouvement.

- Capteur de proximité (SS-2) avec Table (SS-2)
- Capteur photoélectrique (SS-2) avec Table (SS-2)
- Plan incline (SS-2) avec Table (SS-2)
- Stock (SS-2) avec Table (SS-2)
- Table (SS-2) sans base car elle servira d'élément de fixation pour les autres.
- Table (SS-1) sans base car elle servira d'élément de fixation pour les autres.
- Vérin d'éjection (SS-2) avec Transporteur (SS-2)
- Magazine (SS-1) avec Table (SS-1)
- Porte de bras (SS-1) avec Table (SS-1)
- Voyant RESET (SS-2) avec Table (SS-2)
- Voyant START (SS-2) avec Table (SS-2)
- Voyant RESET (SS-1) avec Table (SS-1)
- Voyant START (SS-1) avec Table (SS-1)

Les liaisons fixes jouent un rôle souvent sous-estimé dans la modélisation mécatronique. Elles ne représentent pas de mouvement, mais elles structurent le référentiel global du modèle en ancrant les composants statiques dans l'espace de simulation. Sans elles, les composants dépourvus de liaison cinématique active seraient soumis librement à la gravité et tomberaient, perturbant l'ensemble de la simulation. La table de chaque sous-station joue le rôle d'élément de référence absolu : elle n'est reliée à aucune base, constituant ainsi le point d'ancrage de tout l'édifice cinématique de la sous-station correspondante.

2.2.2.4 prévenir les collisions

Pour garantir le bon fonctionnement et le réalisme de chaque composant, nous devons introduire le mécanisme d'évitement des collisions (Prevent collisions joint dans MCD). Dans de nombreux cas, deux corps peuvent entrer en collision et provoquer un événement indésirable, voire une catastrophe pour notre système. Par exemple, si la ventouse s'en prenait aux pièces, sans ce mécanisme, ce dernier serait projeté au loin.

Les objets qui ont des prévenir les collisions entre eux :

Vérin d'éjection (SS-1) avec le magazine (SS-1).

Ventouse (SS-1) avec pièce blanche.

Ventouse (SS-1) avec pièce noir.

Ventouse (SS-1) avec pièce rouge.

Vérin d’éjection (SS-2) avec Transporteur (SS-2).

Ventouse (SS-1) avec le magazine (SS-1).

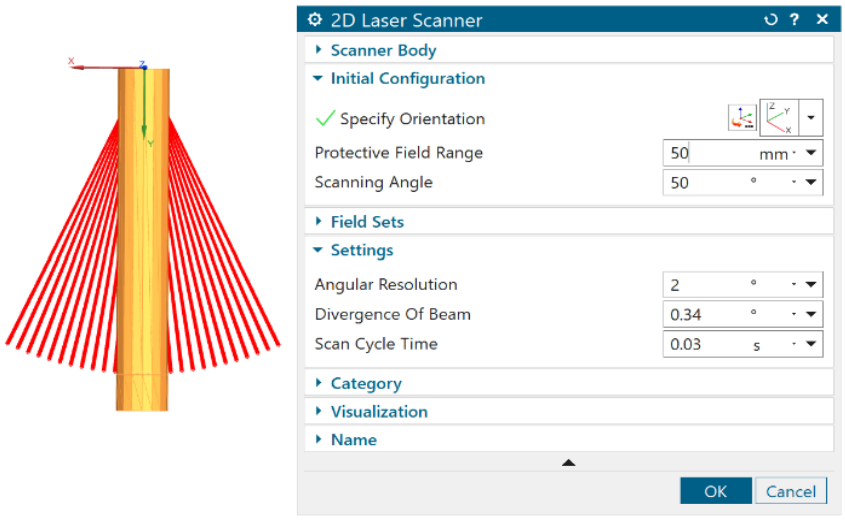
Vérin d’éjection (SS-2) avec capteur de longueur (SS-2)

Le mécanisme de prévention des collisions introduit dans MCD une notion essentielle : la différence entre un contact physique géré et une interférence géométrique incontrôlée. Sans ce mécanisme, le moteur physique permettrait à deux corps de s'interpénétrer librement, produisant des comportements aberrants objets projetés à grande vitesse, instabilités numériques, simulation corrompue. Avec ce mécanisme, MCD calcule les forces de contact nécessaires pour empêcher cette interpénétration, reproduisant ainsi le comportement mécanique réel des surfaces en contact. Son paramétrage pour les couples critiques de notre station garantit que la simulation reste physiquement cohérente tout au long du cycle de fonctionnement.

2.2.2.5 Capteurs

Les capteurs de notre station sont divisés en : capteurs laser qui déterminent l'absence ou la présence de pièces, et capteurs de position pour déterminer l'emplacement actuel de l’actionneur.

Capteur de l’aspiration de ventouse est représenté par un capteur laser, de sorte que la portée du laser est la portée de surveillance de la pièce et ne détectera rien d'autre. Si le bras est en position magazine et que le laser est activé (c'est-à-dire qu'il y a une pièce), alors le capteur d'aspiration est activé, et il reste activé jusqu'à ce qu'il atteigne position aval pour laisse la pièce et désactiver le capteur.



5-Figure 2.5 : Capteur de l’aspiration / relâchement

Protective Field Range : Distance de laser.

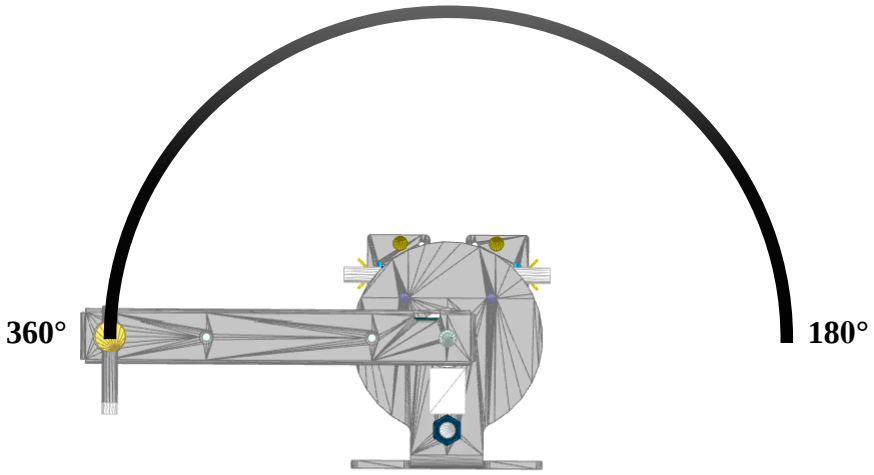
Scanning angle : L'Angle de scan de laser.

Angular Resolution : Distance entre chaque laser.

Divergence Of Beam : Diamètre de laser (0 signifie qu'il s'agit simplement d'une ligne).

Le capteur de sortie et d'entrée de Vérin de magazine est représenté par deux capteurs de fin de course (Limit Switch dans MCD), un pour la position de sortie et l'autre pour la position d'entrée. Notez que le vérin sort de 70 puis revient à 0, Le premier reprend si la position du vérin est inférieure à 10 (ce qui signifie qu'il est en position d'entrée) ou supérieure à 65 (ce qui signifie qu'il est en position de sortie).

Le capteur de position du bras pivotant est représenté par deux capteurs de fin de course. Le premier est responsable de la position magasin, surveillant entre 360 et 350 degrés, et l'autre surveillant entre 190 et 180 degrés.



6-Figure 2.6 : Angle de mouvement du bras pivotant

Le capteur magazine vide est représenté par un capteur laser dont la fonction est de surveiller s'il y a ou non une pièce dans le magazine.

Le capteur de sortie et d'entrée de Vérin d'éjection (SS-2) est représenté par deux capteurs de fin de course, un pour la position de sortie et l'autre pour la position d'entrée.

Le capteur de position de transporteur est représenté par deux capteurs de fin de course comme le cas d'entrée et sortie, mais au lieu que le mouvement soit horizontal, il est vertical, le premier surveille la position haute et le second surveille la position basse.

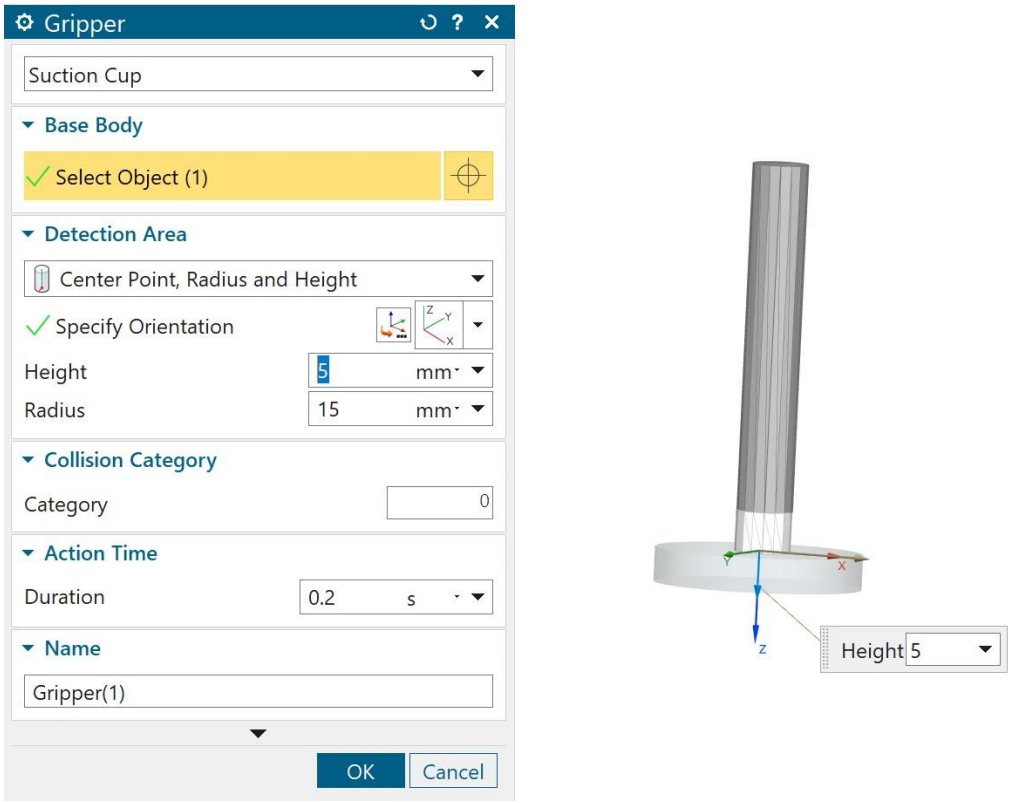
Le capteur photoélectrique est représenté par un capteur laser, comme il se doit, et se charge d'éviter les incidents d'interférence entre le transporteur et le bras de ventouse.

Le capteur de proximité (reliée avec le transporteur) est représenté par un capteur laser.

Le capteur de proximité (reliée avec la table) est représenté par un capteur laser.

2.2.2.6 Mécanisme d'aspiration

Pour que notre ventouse transporte les pièces du magazine au transporteur, nous devons introduire un mécanisme de « gripper » dans « Runtime Behaviors » avec quelques conditions qui seront définies dans « Sequence editor » (cela sera expliqué plus tard).



7-Figure 2.7 : La partie responsable de l'aspiration/du relâchement

Modifiez la hauteur et le rayon de la zone de détection de la ventouse jusqu'à obtenir les paramètres adaptés à l'objet à saisir, puis définissez la durée de l'aspiration.

2.2.2.7 Sequence Editor

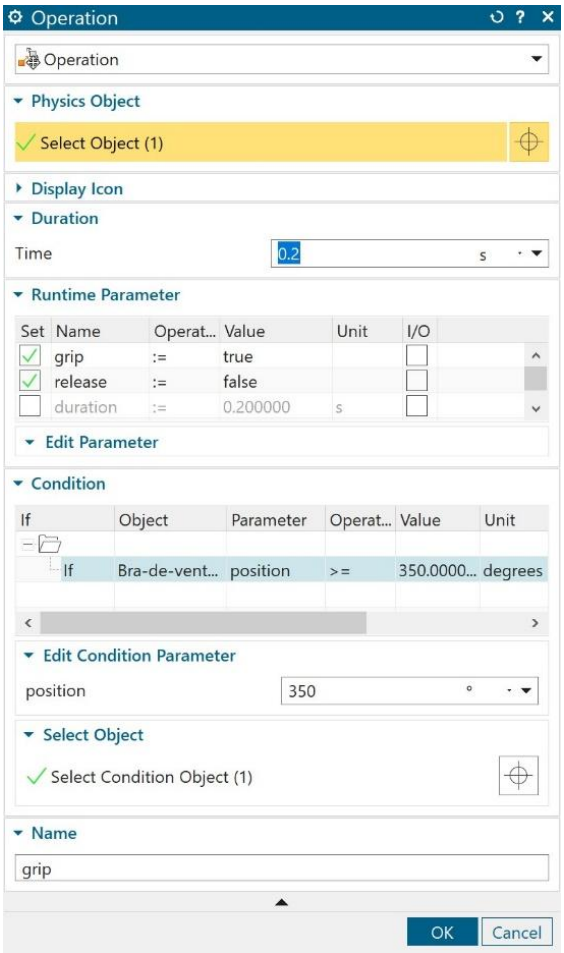
L'éditeur de séquences est l'endroit où nous finalisons le travail côté NX. Il nous permet d'effectuer les actions impossibles à réaliser sur TIA, qui nécessitent des conditions préalables pendant la simulation.

Aspirer et lâcher : Nous avons déjà créé un gripper dans Runtime Behaviors, il nous faut maintenant créer deux opérations de l'aspiration et le relâchement.

Pour la partie aspiration, nous devons cocher les deux cases « grip » et « release », puis définir la prise sur vrai et le relâchement sur faux pour exécuter l'action de préhension, mais sous une condition de : exécute si et seulement si le bras pivotant est entre [350,360[.

Pour la partie relâchement, c'est la même mais on fait l'inverse, la prise faux et le relâchement vrai, sous une condition de :

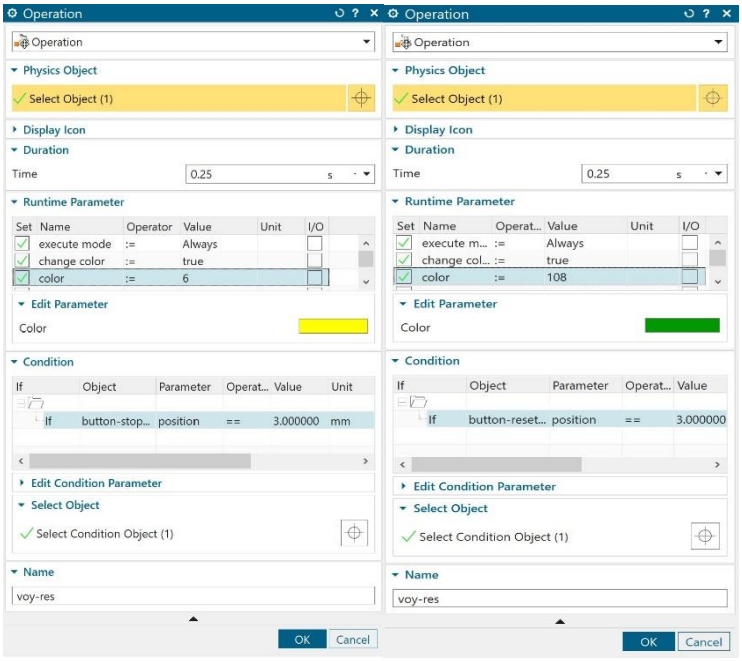
Exécute si et seulement si le bras pivotant est entre [190,180[.



8-Figure 2.8 : Conditions d'aspiration dans l'éditeur de séquence

Allumage des voyants de START et RESET des deux stations : On va créer des « Display changer » pour chaque voyant (Voyant START (SS-1 et SS-2), Voyant RESeT (SS-1 et SS-2)) dans la partie de capteur et actionneur et décocher toutes les cases.

D'abord dans le Sequence editor Nous créons deux opérations, une pour allumer et l'autre pour éteindre.



9-Figure 2.9 : Conditions de changement de couleur des voyants

Fonctionnement des lampes :

Si le bouton de STOP est enfoncé, le voyant de RESET s'allume.

Si le bouton de RESET est enfoncé, le voyant de RESET s'éteint et le voyant de START s'allume.

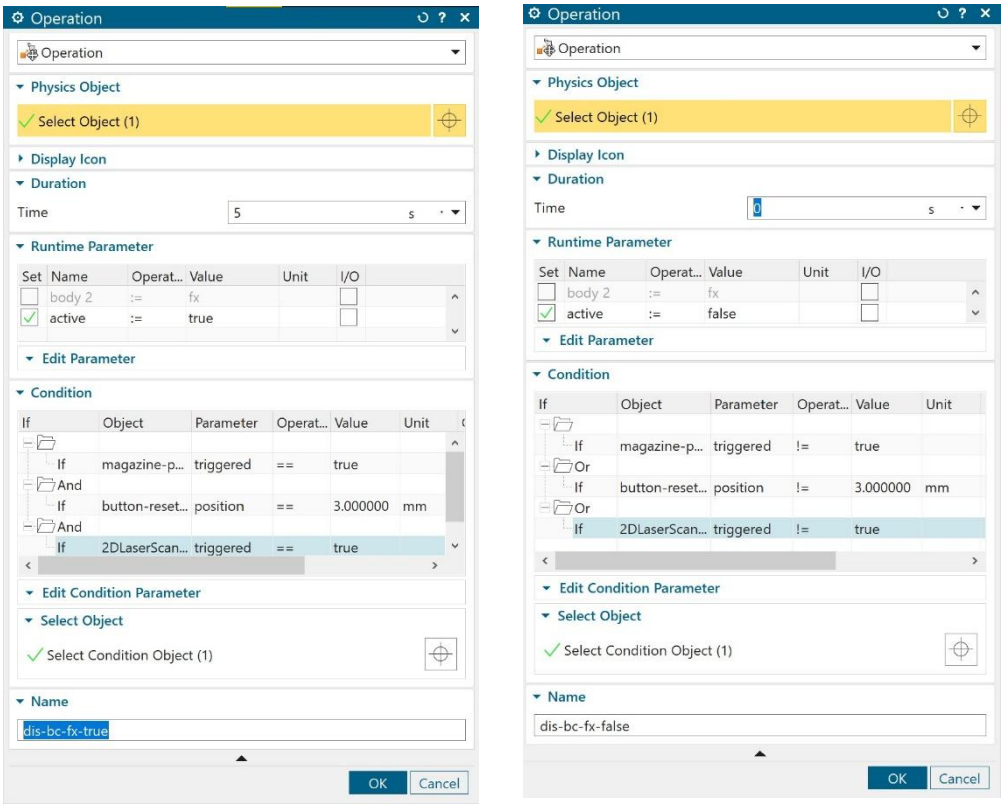
Si le bouton de START est enfoncé, le voyant de START s'éteint.

Système de réinitialisation : En réalité, lorsque nous cliquons sur réinitialiser (RESET), si une pièce se trouve à un emplacement indésirable, nous la ramassons manuellement. Mais dans ce cas précis, nous sommes du côté de la programmation, où une telle chose n'existe pas. Nous avons donc dû créer un système qui retire les pièces des emplacements indésirables de la station afin d'éviter tout dysfonctionnement.

Nous devons créer un évitement des collisions entre tous les types de pièces (blanches, noires, rouges) avec le magazine. Nous paramétrons son activation ou sa désactivation dans l'éditeur de séquences. Cependant, si elle est activée, toutes les pièces seront supprimées de magazine, même celles qui n'ont pas encore été éjectée. Pour éviter cela, nous créons un objet aléatoire de forme rectangulaire pour la collision, placé à l'endroit où les pièces tombent initialement, et nous établissons un évitement des collisions entre cet objet et le magazine afin d'éviter tout conflit. Ainsi, lorsque nous activons notre système de réinitialisation, toutes les pièces présentes dans la zone de stockage seront supprimées, à l'exception de celles qui n'ont pas encore été déplacées.

Il devrait y avoir une opération d'activation et une opération de désactivation pour chaque type de pièce stockée, soit 6 au total, et 6 également du côté du transporteur.

Et nous avons créé un capteur laser à l'extrémité de la zone de stockage, au moment où les pièces sont ramassées, afin de détecter la présence d'une pièce.



10-Figure 2.10 : Quelques conditions d'activation et désactivation de prévention de collision

Les conditions d'activations :

Magazine n'est pas vide **ET** Le bouton de RESET est cliqué **ET** il y a une pièce au bout de magazine

Si ces conditions étaient vraies, les pièces situées aux endroits indésirables traverseraient le magazine sous l'effet de la gravité.

Les conditions de désactivation :

Magazine vide **OU** Le bouton de RESET n'est pas cliqué **OU** il n'y a pas une pièce au bout de magazine.

Même chose pour le transporteur, mais en plus simple, on crée un évitement des collisions entre le transporteur et les différents types de pièces, et les conditions d'activation et de désactivation se trouvent dans l'éditeur de séquence.

L'éditeur de séquences illustre parfaitement la philosophie hybride qui sous-tend le commissionnement virtuel : certaines logiques appartiennent naturellement au

programme automate, tandis que d'autres sont intrinsèquement liées à la physique simulée et doivent être prises en charge côté NX. Cette répartition des responsabilités entre les deux environnements NX pour la physique, TIA Portal pour la logique de commande est précisément ce qui donne au jumeau numérique sa cohérence et sa validité en tant qu'outil de validation.

Indicateur de pression : Nous créons deux opérations pour chaque station, l'une fait tourner la flèche de pression lorsque l'on clique sur le bouton ON, et l'autre la fait revenir à sa position initiale lorsque l'on clique sur le bouton STOP.

2.2.2.8 la réapparition des pièces

Dans le navigateur physique, nous créons une source d'objet dans le dossier de physique de base. Nous en créons une pour chaque type de pièce. L'événement se produit une seule fois par activation, ce qui nous permet de contrôler quand et comment faire apparaître la pièce, et quel type de pièce choisir.

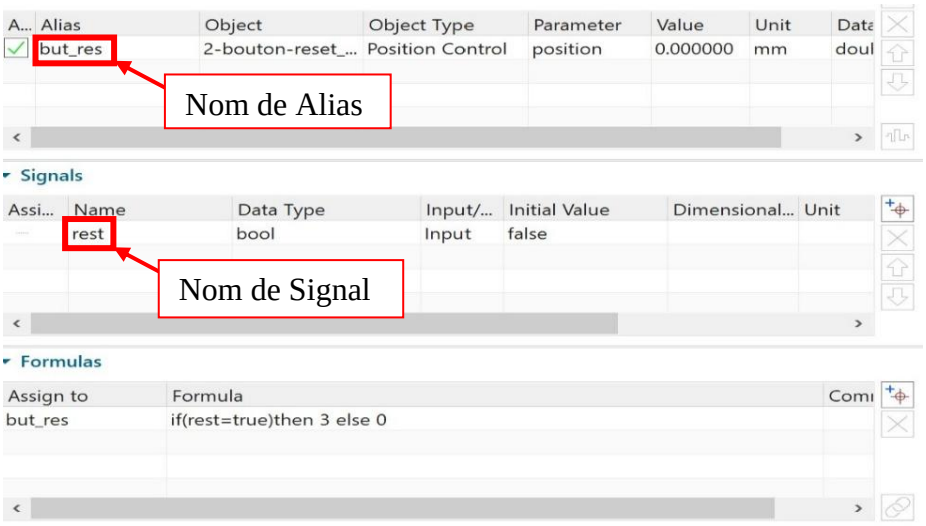
La source d'objets dans MCD reproduit fidèlement la réalité opérationnelle de la station : le magasin est rechargé en pièces entre les cycles, et la simulation peut se poursuivre indéfiniment sans intervention manuelle. Le contrôle précis du moment d'apparition, du type de pièce généré et du nombre d'occurrences par activation offre une flexibilité qui permet de tester différents scénarios pièces de différentes couleurs, cadences variables sans modifier la configuration physique du modèle.

2.2.3 Paramétrage des E/S

2.2.3.1 Création des signaux

Dans NC MCD tout ce qui est actionneur est entré sous forme de « signal adapter » et définie comme un Entrée (input) et il est obligatoire de créer un SymbolTable pour chaque input, et tout ce qui est capteur est entré sous forme de « signal » et définie comme un Sortie (output).

Les 3 boutons (start, reset, stop) dans les deux sous-stations est définie comme inputs et le paramètre est la position, avec condition



11-Figure 2.11 : Nom d'alias et nom de signal pour la création d'une formule

If (**[nom de signal]** =true) then 3 else 0

Si notre signal est une entrée, nous cochons la case à gauche du nom de l'alias pour lui ajouter une formule, s'il s'agit d'une sortie et qu'il est utilisé comme adaptateur de signal, nous cochons la case à gauche du nom du signal.

- Le transporteur est un input, paramètre est position

If (**[nom de signal]** =true) then 120 else 0

- La Vérin de SS-2 est un input, paramètre est position

If (**[nom de signal]** =true) then 65 else 0

- Les deux capteurs de position de Vérin de SS-1 sont des outputs, paramètre est switch.
- Le capteur de proximité de SS-2 (fixée avec la table) est un output, nom de paramètre est triggered.
- Le bras pivotant de SS-1 est un input, paramètre position

If (**[nom de signal]** =true) then 189 else -7

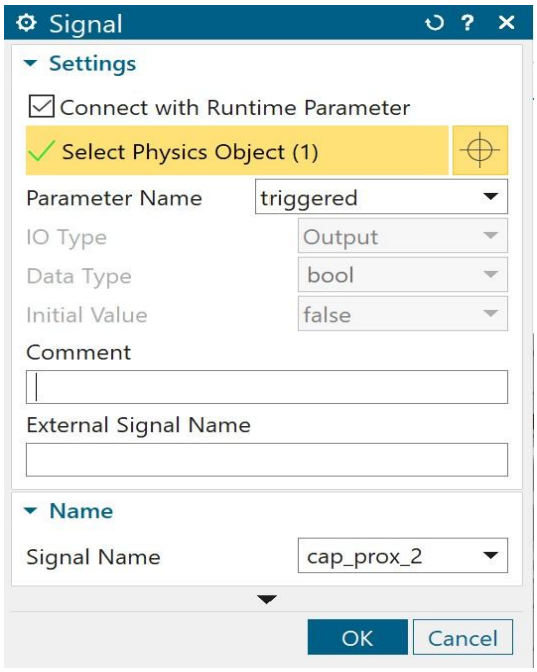
- La ventouse est un input de paramètre position (rotation dans le sens inverse du bras)

If (**[nom de signal]** =true) then 171 else 7

- La Vérin de SS-1 est un input, paramètre position

If (**[nom de signal]** =true) then 70 else 0

- Le capteur de proximité de SS-2 (fixée avec le transporteur) est up output, nom de paramètre est triggered.

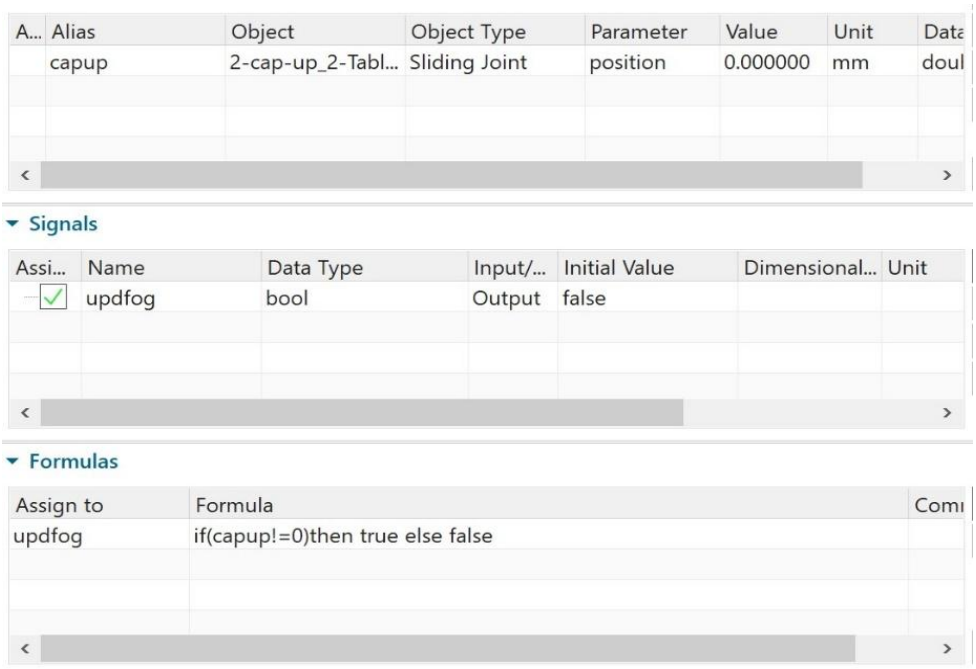


12-Figure 2.12 : Contenu de la fenêtre de signal

- Le capteur magazine vide est un output, paramètre triggered.
- Le capteur photoélectrique est un output, paramètre triggered.
- Les deux capteurs de position de transporteur sont des outputs, paramètre est switch.
- Le capteur de l'aspiration de ventouse est un output, paramètre est active car il y a plusieurs difficultés d'implémentée cette capteur donc on va ajouter deux opérations dans la partie de « Sequence Editor » (ce point sera expliqué plus tard).
- Les deux capteurs de position de Vérin de magazine de SS-1 et la Vérin de SS-2 sont des outputs, paramètre switch.
- Le capteur de longueur constitue un cas particulier car nous l'avons considéré uniquement comme un capteur de présence, et par conséquent nous l'avons considéré comme un output, paramètre de position avec condition

  If (**[nom de alias]**! =0) then true else false

Le paramétrage des entrées/sorties constitue, en définitive, le pont numérique entre la physique simulée dans NX et la logique programmée dans TIA Portal. Chaque signal d'entrée traduit un ordre du programme automate en un mouvement physique du modèle ; chaque signal de sortie traduit un état physique du modèle en une information disponible pour le programme automate. La cohérence et l'exhaustivité de ce paramétrage conditionnent directement la validité de la co-simulation : un signal manquant ou mal formulé peut conduire à un comportement erroné du cycle complet. C'est pourquoi chaque signal a été défini avec sa formule conditionnelle précise, reflétant fidèlement la logique du composant physique qu'il représente.



13-Figure 2.13 : Le cas particulier du capteur de longueur

2.3 Validation du Comportement Cinématique

2.3.1 Simulation en boucle ouverte

La validation cinématique du modèle MCD est réalisée en boucle ouverte, c'est-à-dire sans connexion à un automate. Les signaux de commande sont activés manuellement par l'utilisateur à travers l'interface du MCD (panneau de commande virtuel ou modification directe des signaux). La simulation en boucle ouverte permet de vérifier :

1. Que chaque actionneur répond correctement à son signal de commande.
2. Que les mouvements des composants sont conformes aux attentes (direction, amplitude, vitesse).
3. Que les capteurs virtuels génèrent les signaux attendus en fonction de la position des composants.
4. Que les interactions entre les composants (contacts, collisions) sont correctement simulées.

Procédure de test en boucle ouverte :

Test 1 : Vérin du magazine (SS-1) :

1. Activation du signal Vérin → la tige du vérin doit sortir de 70mm.

2. Vérification du signal Vérin-sortie → doit passer à TRUE.

3. Désactivation du signal Vérin → la tige doit revenir en position initiale de 0mm.

4. Vérification du signal Vérin-rentre → doit passer à TRUE.

Test 2 : Bras pivotant (SS-1) :

1. Activation du signal Bras-pivotant → le bras doit pivoter de 189°.

2. Vérification du signal Bras-pivotant-aval → doit passer à TRUE.

3. Désactivation du signal Bras-pivotant → le bras doit pivoter à -7°.

4. Vérification du signal Bras-pivotant-magazine → doit passer à TRUE.

Test 3 : Transporteur (SS-2) :

1. Activation du signal Transporteur → le transporteur s'élève de 120mm.

2. Vérification du signal Transporteur-dessus→ doit passer à TRUE.

3. Désactivation du signal Transporteur → le Transporteur descend à 0mm.

4. Vérification du signal Transporteur-dessous → doit passer à TRUE.

Test 4 : Vérin d'éjection (SS-2) :

1. Activation du signal Vérin-2 → la tige du vérin doit sortir de 65mm.

2. Vérification du signal Vérin-2-sortie → doit passer à TRUE.

3. Désactivation du signal Vérin-2 → la tige doit revenir en position initiale de 0mm.

4. Vérification du signal Vérin-2-rentre → doit passer à TRUE.

Test 5 : Séquence complète :

1. Exécution manuelle de l'ensemble de la séquence de la station Distribution.

2. Vérification que chaque étape se déroule correctement et que les transitions sont cohérentes.

2.3.2 Vérification des trajectoires

La vérification des trajectoires consiste à s'assurer que les mouvements des composants mobiles suivent les chemins attendus et que les positions finales sont correctes.

Pour le vérin d'éjection (SS-1) :

- La trajectoire est rectiligne selon l'axe Z.
- La pièce éjectée se déplace correctement hors du magasin.

Pour le bras pivotant (SS-1) :

- La trajectoire est circulaire dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe Z).
- Les positions angulaires de prise et de dépose sont correctement atteintes.

Pour le Transporteur (SS-2) :

- La trajectoire est rectiligne selon l'axe Y.
- La pièce placée est transférée en douceur sur le dessus.

Pour le vérin d'éjection (SS-2) :

- La trajectoire est rectiligne selon l'axe X.
- La pièce éjectée se déplace correctement hors le transporteur.

2.3.3 Détection des interférences

Lors de la simulation cinématique, les interférences entre les composants sont surveillées :

- Aucune interférence ne doit se produire entre le bras pivotant et la structure de la station pendant la rotation.
- La pièce ne doit pas traverser les parois du magasin lors de l'éjection, ni être projetée ou éjectée du transporteur jusqu'à ce que le vérin.
- La ventouse ne doit pas entrer en collision avec d'autres composants lors des mouvements.

Si des interférences sont détectées, les causes possibles sont analysées :

- Erreur de positionnement d'un composant → correction de la position.
- Erreur de positionnement d'une liaison → correction des paramètres de la liaison.
- Corps de collision trop large ou mal positionné → ajustement du corps de collision.

2.3.4 Validation finale du modèle

La validation finale du modèle mécatronique confirme que :

La géométrie est correcte : Toutes les dimensions correspondent aux plans techniques de la station réelle.

1. Les liaisons mécaniques sont correctement paramétrées : Les courses, les angles et les limites sont conformes aux spécifications.
2. Les actionneurs fonctionnent correctement : Les mouvements sont fluides, réalistes et conformes aux attentes.
3. Les capteurs virtuels génèrent les signaux corrects : Les transitions des signaux sont cohérentes avec les positions des composants.

4. Les interactions physiques sont réalistes : Les pièces tombent sous l'effet de la gravité, les collisions sont correctement gérées et la préhension par ventouse fonctionne.
5. Le modèle mécatronique validée constitue la base du jumeau numérique. Il est prêt à être connecté au programme automate pour réaliser la co-simulation.

Conclusion

Ce deuxième chapitre a présenté la méthodologie complète de modélisation et de développement du jumeau numérique sous Siemens NX. La modélisation CAO 3D a permis de créer une représentation géométrique fidèle de la station Distribution. La configuration dans le module MCD a enrichi ce modèle avec des propriétés physiques, des liaisons mécaniques, des actionneurs et des capteurs virtuels. La validation cinématique en boucle ouverte a confirmé la cohérence et le réalisme du modèle. Le chapitre suivant sera consacré à l'intégration de ce modèle avec le programme automate développé dans TIA Portal, complétant ainsi le jumeau numérique.

CHAPITRE III

Intégration et Validation

INTRODUCTION

Après avoir développé une modélisation CAO 3D complète de la station Distribution du FESTO MPS 500 et validé son comportement cinématique dans l'environnement Mechatronics Concept Designer de Siemens NX (Chapitre 2), nous abordons dans ce troisième chapitre l'étape cruciale de l'intégration du jumeau numérique avec le système de commande réel. Cette phase constitue le point d'aboutissement de notre démarche de Virtual Commissioning et représente le passage d'un simple modèle géométrique vers un véritable jumeau numérique opérationnel.

L'objectif principal de ce chapitre est de créer un environnement de co-simulation permettant de tester et valider le programme automate. Cette approche s'inscrit pleinement dans la philosophie de l'Industrie 4.0, où la réduction des risques, l'optimisation des coûts et la diminution des temps de mise en service constituent des enjeux majeurs pour les industriels.

Le chapitre s'articule autour de trois axes fondamentaux. Premièrement, nous présentons le développement du programme automate dans l'environnement TIA Portal, en nous appuyant sur une méthodologie GRAFCET pour structurer la logique séquentielle de la station Distribution. Cette étape inclut la configuration matérielle de l'automate programmable (API) Siemens S7-1500, ainsi que la mise en œuvre de PLCSIM Advanced pour permettre la simulation logicielle.

Deuxièmement, nous détaillons la mise en place du couplage entre le jumeau numérique sous Siemens NX et le programme automate dans TIA Portal. Cette interconnexion, réalisée par liaison signal directe, constitue le cœur technique du Virtual Commissioning. Elle nécessite un mapping rigoureux entre les entrées/sorties du modèle virtuel et les variables de l'API, garantissant ainsi une synchronisation cohérente entre les deux environnements.

Enfin, la troisième section est consacrée à la validation globale du jumeau numérique à travers l'exécution de simulations complètes en co-simulation. Nous évaluons la fidélité du comportement virtuel par rapport au système réel, testons différents scénarios de fonctionnement et analysons les performances et les apports concrets du jumeau numérique développé.

Ce chapitre démontre ainsi comment l'intégration harmonieuse entre la modélisation mécatronique et la programmation automate permet de créer un

environnement de test virtuel complet, réduisant significativement les risques et les coûts associés à la mise en service des systèmes automatisés industriels.

3.1 Programmation de l'Automate dans TIA Portal

3.1.1 Configuration matérielle

Dans le cadre de notre projet de Master portant sur la simulation d'une station du système modulaire de production Festo MPS500, à travers l'environnement de mise en service virtuelle NX MCD couplé à TIA Portal V16 et PLCSIM Advanced, le choix de l'automate programmable industriel constitue une étape fondamentale et déterminante pour la réussite du projet. Après une analyse approfondie des exigences techniques, fonctionnelles et logicielles, notre choix s'est porté sur le contrôleur SIMATIC S7-1512C-1 PN de Siemens, identifié par la référence 6ES7 512-1CK00-0AB0. Ce choix repose sur plusieurs critères que nous détaillons ci-dessous.

Tout d'abord, la lettre « C » dans la désignation du CPU signifie « Compact ». Cela implique que ce contrôleur dispose d'entrées et de sorties numériques et analogiques intégrées directement sur le module CPU, sans nécessiter l'ajout de modules d'extension supplémentaires. Plus précisément, le CPU 1512C-1 PN offre 32 entrées numériques (DI) et 32 sorties numériques (DQ), ainsi que 5 entrées analogiques (AI) et 2 sorties analogiques (AQ). Cette densité d'E/S intégrées correspond parfaitement aux besoins d'une station Festo MPS500, qui mobilise généralement entre 16 et 24 signaux numériques pour la gestion des capteurs (détecteurs de présence, capteurs inductifs, capteurs optiques) et des actionneurs (vérins pneumatiques, moteurs de convoyeur, électrovannes). Cette caractéristique compacte réduit considérablement la complexité du montage matériel et simplifie la configuration dans TIA Portal.

Ensuite, le CPU 1512C-1 PN intègre des compteurs rapides (HSC – High Speed Counters) ainsi que des sorties à modulation de largeur d'impulsion (PWM). Ces fonctions technologiques sont essentielles lorsque la station simulée utilise des codeurs incrémentaux pour le positionnement des convoyeurs ou des capteurs à haute fréquence pour le tri des pièces. Dans le contexte de notre simulation sous NX MCD, ces fonctions permettent de reproduire fidèlement le comportement dynamique de la station réelle, garantissant ainsi une haute-fidélité du jumeau numérique.

En ce qui concerne les performances de traitement, le CPU 1512C-1 PN offre un temps d'exécution de 48 nanosecondes par opération binaire, avec une mémoire de travail

de 250 Ko pour le programme et 1 Mo pour les données. Ces capacités sont amplement suffisantes pour gérer l'ensemble des blocs fonctionnels, des tables de variables (tags) et des blocs de communication nécessaires à l'échange de données entre PLCSIM Advanced et NX MCD. Cette capacité mémoire garantit qu'aucun débordement de cycle ne se produira lors de l'exécution simultanée du programme automate et de la synchronisation avec le modèle virtuel.

Par ailleurs, l'interface PROFINET intégrée (1 PN) constitue un atout majeur. Elle permet une communication fluide et en temps réel entre le programme automate simulé dans PLCSIM Advanced et le modèle mécatronique conçue dans NX MCD, via l'adaptateur Ethernet virtuel. Cette interface supporte également le mode isochrone, qui est crucial pour synchroniser le cycle de balayage de l'automate avec le moteur physique de NX MCD, évitant ainsi tout phénomène de gigue (jitter) dans la simulation.

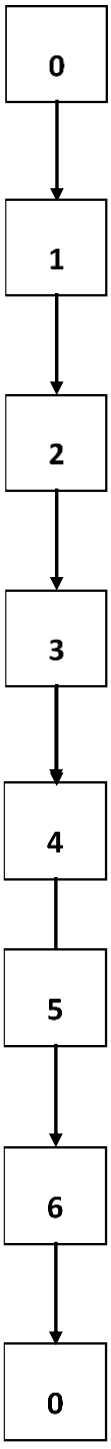
Quant au choix spécifique de la référence 6ES7 512-1CK00-0AB0, il est motivé par sa compatibilité totale avec PLCSIM Advanced (versions 3.0 à 6.0) et avec TIA Portal V16. Cette version du firmware est nativement reconnue dans le catalogue matériel de TIA Portal V16 sans nécessiter l'installation de packages de support matériel (HSP) supplémentaires, ce qui assure une stabilité optimale de l'environnement de développement. De plus, cette référence correspond exactement au matériel industriel standardisé que l'on retrouverait dans une armoire de commande réelle pilotant une station Festo MPS500, ce qui préserve l'intégrité du concept de jumeau numérique et facilite une éventuelle transition de la simulation vers le système physique réel.

En résumé, le CPU 1512C-1 PN (6ES7 512-1CK00-0AB0) représente le compromis optimal entre richesse fonctionnelle, densité d'E/S intégrées, performances de traitement et compatibilité logicielle avec l'écosystème TIA Portal – PLCSIM Advanced – NX MCD. Ce choix garantit une mise en service virtuelle fiable, réaliste et conforme aux standards industriels actuels.

3.1.2 Développement du GRAFCET

Le GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande des Étapes et Transitions) est l'outil de modélisation utilisé pour décrire le comportement séquentiel de la station Distribution. Le GRAFCET est conforme à la norme IEC 60848 et constitue la base de la programmation automate.

GRAFCET principal de la station :



État initial

Éjection de la pièce

Action : Le vérine (SS-1) sort, pousse la pièce, puis revient.

Saisie de la pièce

Action : Le bras arrive au magazine, la ventouse aspire la pièce.

Transfert vers position dépose

Action : Le bras arrive à l'aval.

Dépose de la pièce

Action : la ventouse libère la pièce, le bras retourne au magazine.

Éjection de la pièce hors de la station

Action : Le transporteur se lève, le vérine (SS-2) pousse la pièce.

Le retour du transporteur

Action : Le bras revient, le transporteur redescend.

Retour à l'état initial

3.1.3 Implémentation en LAD/SFC

Après avoir élaboré le GRAFCET théorique de la station Distribution (section 3.1.2), il est nécessaire de traduire cette logique de commande séquentielle dans un langage de programmation compatible avec l'automate Siemens et exploitable dans l'environnement TIA Portal. Cette étape d'implémentation constitue le passage du modèle conceptuel vers le programme exécutable par l'API.

La norme IEC 61131-3, qui régit la programmation des automates programmables industriels, définit cinq langages de programmation standardisés. Parmi ceux-ci, deux se distinguent particulièrement pour la programmation de logiques séquentielles : le LADDER (LAD) et le Sequential Function Chart (SFC).

Le langage LADDER (schéma à contacts) est un langage graphique dont la représentation s'inspire des schémas électriques à relais traditionnels. Il utilise une notation symbolique composée de contacts (entrées), de bobines (sorties) et de blocs fonctionnels organisés sous forme de réseaux (networks). Chaque réseau représente une ligne logique qui s'exécute de gauche à droite. Le LADDER présente l'avantage d'être intuitif pour les techniciens familiarisés avec les schémas électriques classiques et permet une visualisation claire des conditions logiques. Il est particulièrement adapté pour la programmation de logiques combinatoires et de séquences simples, bien que son utilisation pour des automatismes complexes puisse conduire à des programmes volumineux et difficiles à maintenir.

Le langage SFC (Sequential Function Chart), également appelé GRAFCET normalisé, est un langage graphique spécifiquement conçu pour décrire les systèmes séquentiels. Il reprend directement les concepts du GRAFCET (étapes, transitions, actions, réceptivités) et offre une représentation visuelle structurée du déroulement séquentiel du processus. Dans TIA Portal, le SFC permet de définir des étapes auxquelles sont associées des actions à exécuter, reliées par des transitions conditionnées par des réceptivités. Ce langage présente l'avantage majeur de conserver une forte cohérence avec la modélisation GRAFCET élaborée en phase de conception, facilitant ainsi la traçabilité entre spécification et implémentation. Il est particulièrement recommandé pour les automatismes séquentiels complexes comportant de nombreux modes de marche et des synchronisations multiples.

Pour notre projet, nous avons choisi d'implémenter le programme automate en langage SFC. Ce choix se justifie par plusieurs raisons fondamentales. Premièrement, le

SFC offre une simplicité de mise en œuvre remarquable : la transcription du GRAFCET conçu précédemment vers le SFC de TIA Portal est quasi directe, les étapes, transitions et actions se transposant naturellement d'un formalisme à l'autre. Deuxièmement, ce langage garantit une facilité de compréhension exceptionnelle, tant pour le développeur que pour les futurs utilisateurs ou mainteneurs du système. La structure visuelle du SFC permet de saisir instantanément l'enchaînement séquentiel des opérations de la station Distribution, contrairement au LADDER qui nécessiterait de parcourir de nombreux réseaux pour reconstituer mentalement la logique globale. Enfin, cette approche assure une cohérence méthodologique optimale entre la phase de conception (GRAFCET) et la phase d'implémentation (SFC), réduisant ainsi les risques d'erreurs de transcription et facilitant la validation du programme.

3.1.3.1 Table de variables standard

Variable	Adresse	Type	Commentaire
Bras_aval	I0.0	Bool	Détecte que le bras pivotant est en aval
Bras_mag	I0.1	Bool	Détecte que le bras pivotant est en magazine
Vent_aspire	I0.2	Bool	Détecte si la ventouse a aspiré
Mag_pas_vide	I0.3	Bool	Détecte si le magazine n'est pas vide
Vérin1_rentre	I0.4	Bool	Détecte si la Vérin (SS-1) rentre
Vérin1_sorti	I0.5	Bool	Détecte si la Vérin (SS-1) sorti
START1_bouton	I0.6	Bool	Bouton de démarrage contrôlable (SS-1)
RESET1_bouton	I0.7	Bool	Bouton de réinitialisation contrôlable (SS-1)
STOP1_bouton	I1.0	Bool	Bouton d'arrêt contrôlable (SS-1)
Cap_prox	I1.1	Bool	Détecte la présence et l'absence de pièces (capteur fixée avec table SS-2)

Cap_de_trans	I1.2	Bool	Détecte la présence et l'absence de pièces (capteur fixée avec transporteur SS-2)
Cap_photo	I1.3	Bool	Prévient les accidents entre le transporteur et le bras pivotant
Cap_longueur	I1.4	Bool	Détecte la hauteur des pièces (dans notre cas, il détecte uniquement la présence et l'absence).
RESET2_bouton	I1.5	Bool	Bouton de réinitialisation contrôlable (SS-2)
START2_bouton	I1.6	Bool	Bouton de démarrage contrôlable (SS-2)
STOP2_bouton	I1.7	Bool	Bouton d'arrêt contrôlable (SS-2)
Vérin2_rentre	I2.0	Bool	Détecte si la Vérin (SS-2) rentre
Vérin2_sorti	I2.1	Bool	Détecte si la Vérin (SS-2) sorti
Trans_basse	I2.2	Bool	Détecte si le transporteur est en position basse
Trans_haut	I2.3	Bool	Détecte si le transporteur est en position haut
Bras_pivotant	Q0.0	Bool	Le bras chargé du transport des pièces du magazine à transporteur
Vérin1	Q0.1	Bool	Le Vérin (SS-1) chargé de pousser les pièces hors du magazine
Ventouse	Q0.2	Bool	Responsables de l'aspiration/du lâcher des pièces
Reset1	Q0.3	Bool	Les mouvements du bouton selon la commande de RESET1 (SS-1)
Start1	Q0.4	Bool	Les mouvements du bouton selon la commande de START1 (SS-1)
Stop1	Q0.5	Bool	Les mouvements du bouton selon la commande de STOP1 (SS-1)

Reset2	Q0.6	Bool	Les mouvements du bouton selon la commande de RESET1 (SS-2)
Start2	Q0.7	Bool	Les mouvements du bouton selon la commande de START1 (SS-2)
Stop2	Q1.0	Bool	Les mouvements du bouton selon la commande de STOP1 (SS-2)
Transporteur	Q1.1	Bool	Responsable de la téléportation des pièces du bas vers le haut
Vérin2	Q1.2	Bool	Chargé de pousser les pièces hors de la station

3-Tableau 3.1 : Table de variables

3.1.3.2 Bloc fonctionnel SFC

Avant de présenter le diagramme SFC complet de la station Distribution, il convient de préciser la méthodologie adoptée pour sa structuration dans TIA Portal. Le programme a été organisé de manière modulaire afin d'assurer une lisibilité optimale et une maintenance aisée. La déclaration préalable de l'ensemble des variables d'entrées/sorties, des variables internes et des temporisations a été réalisée dans la table des variables du projet, en respectant les conventions de nommage industrielles. Les actions associées à chaque étape ont été programmées directement dans les blocs d'action du SFC. Les transitions sont quant à elles définies par des expressions booléennes exploitant les signaux des capteurs de la station et les conditions logiques de sécurité.

Graphe de sécurité de SS-1 :

X1	S1 - Step1: ..... Interlock | Evénement | Identificateur | Action S1 OFF #Step4 S1 OFF #Step5 S1 OFF #Step6 S1 OFF #Step7 S1 OFF #Step9 S1 OFF #Step10 S "Stop1" "Stop1" %Q0.5 R "Start1" "Start1" %Q0.4 <ajouter>	T1 - Trans1: ..... %I1.0 "STOP1_bouton" %I0.7 "RESET1_bouton" %I2.3 "Trans_basse"

4-Tableau 3.2 : L'étape 1 et transition de GS SS-1

La première étape du graphe de sécurité doit avoir toutes les étapes du graphe de fonction de SS-1 désactivées. Comme il s'agit de l'étape où le système est arrêté, le bouton d'arrêt doit être activé. Pour que les transitions passent à l'étape suivante, la valeur du

bouton de réinitialisation doit être définie sur VRAI et le transporteur doit être en position basse.

X2	S2 - Step2: Interlock / Evénement / Identificateur / Action S "Bra_pivotant" "Bra_... %Q0.0 S "Ventouse" "Vent... %Q0.2 R "Vérine1" "Véri... %Q0.1 S "Reset1" "Reset1" %Q0.3 <ajouter>	T2 - Trans2: %I0.3 "Mag_pas_vide" %I0.0 "Bra_aval" %I0.6 "START1_bouton" %I1.0 "STOP1_bouton" #Step2.U > Time t#2S

5-Tableau 3.3 : L'étape 2 et transition de GS SS-1

À la deuxième étape, après avoir cliqué sur le bouton de réinitialisation, tous les actionneurs doivent revenir à leur position initiale correcte afin de préparer le démarrage du système. Le bras pivotant (ventouse incluse) doit être en position aval. La Vérin de SS-1 ne doit pas être sorti. Le bouton de réinitialisation étant activé suite à l'étape précédente, il doit être actionné.

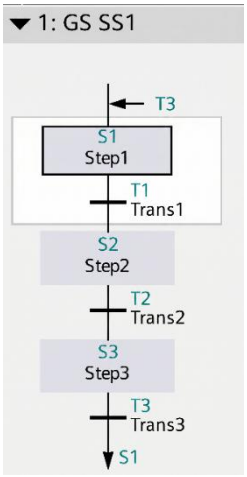
Pour passer à l'étape suivante, le stock ne doit pas être vide et le bras pivotant doit être en position aval. Il faut ensuite activer le bouton de démarrage (valeur VRAI). Après 2 secondes, l'étape suivante sera activée.

X3	S3 - Step3: Interlock / Evénement / Identificateur / Action S1 ON #Step4 S "Start1" "Start1" %Q0.4 R "Reset1" "Reset1" %Q0.3 R "Stop1" "Stop1" %Q0.5 <ajouter>	T3 - Trans3: %I1.0 "STOP1_bouton"

6-Tableau 3.4 : L'étape 3 et transition de GS SS-1

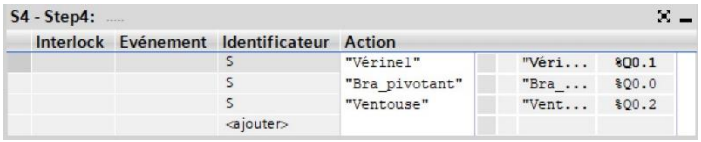
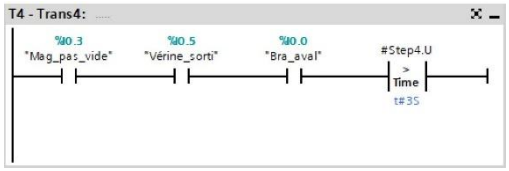
Pour la 3éme et dernière étape du graphe de sécurité de SS-1, nous avons cliqué sur le bouton de démarrage lors de la transition précédente afin que le système démarre à partir de l'étape 4 (première étape du graphe fonctionnel de SS-1). Le bouton de démarrage doit être activé, tandis que les boutons de réinitialisation et d'arrêt doivent être désactivés. Pour activer la transition et passer à l'étape suivante, nous devons définir la valeur du bouton d'arrêt sur VRAI.

Le graph de sécurité de SS-1 devrait donc ressembler à ceci.



14-Figure 3.1 : Graph de sécurité de sous-station 1

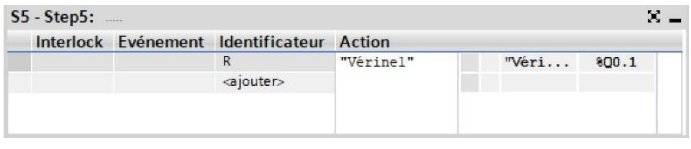
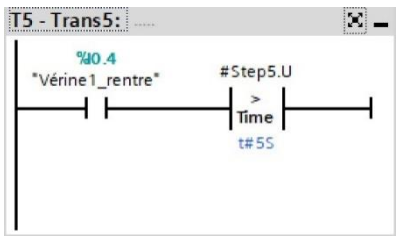
Graph de fonctionnement de SS-1 :

X4		

7-Tableau 3.5 : L'étape 1 et transition de GF SS-1

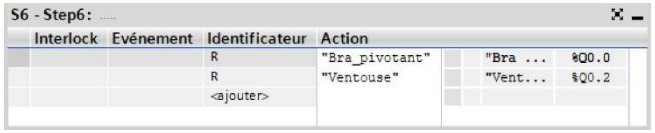
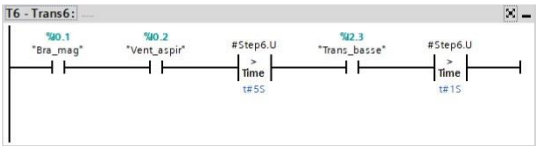
À la première étape du graphe fonctionnel, la Vérin sortie pour pousser une pièce. Les deux autres commandes servent simplement à garantir le bon démarrage du cycle.

La transition est assurée par des capteurs, qui laissent trois secondes pour l'exécution de l'action.

X5		

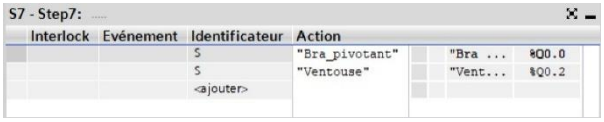
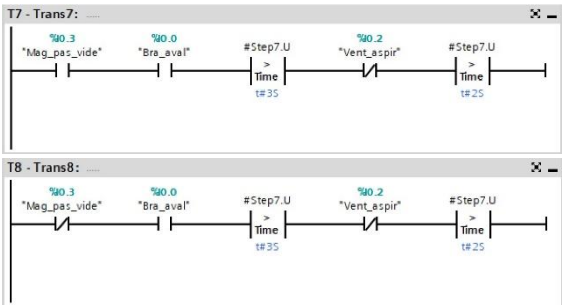
8-Tableau 3.6 : L'étape 2 et transition de GF SS-1

À la 5éme étape, la Vérin rentre et le capteur le détecte.

X6		

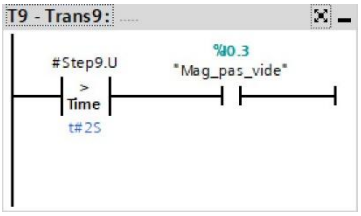
9-Tableau 3.7 : L'étape 3 et transition de GF SS-1

À la 6éme étape, le bras pivotant se déplace vers le magazine pour récupérer les pièces poussées par la Vérin et aspirées par la ventouse, afin de se préparer à retourner en position aval pour y déposer les pièces.

X7		

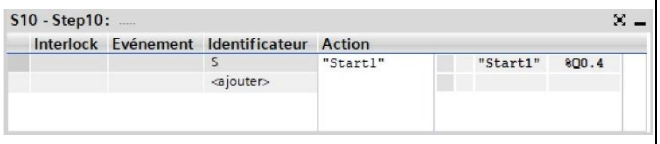
10-Tableau 3.8 : L'étape 4 et transition de GF SS-1

Le retour du bras pivotant à la position aval, si le magazine n'était pas vide (le cas de T7), alors nous revenons au début du cycle (étape 4), sinon (le cas de T8) on va continuer à l'étape suivante.

X9		

11-Tableau 3.9 : L'étape 5 et transition de GF SS-1

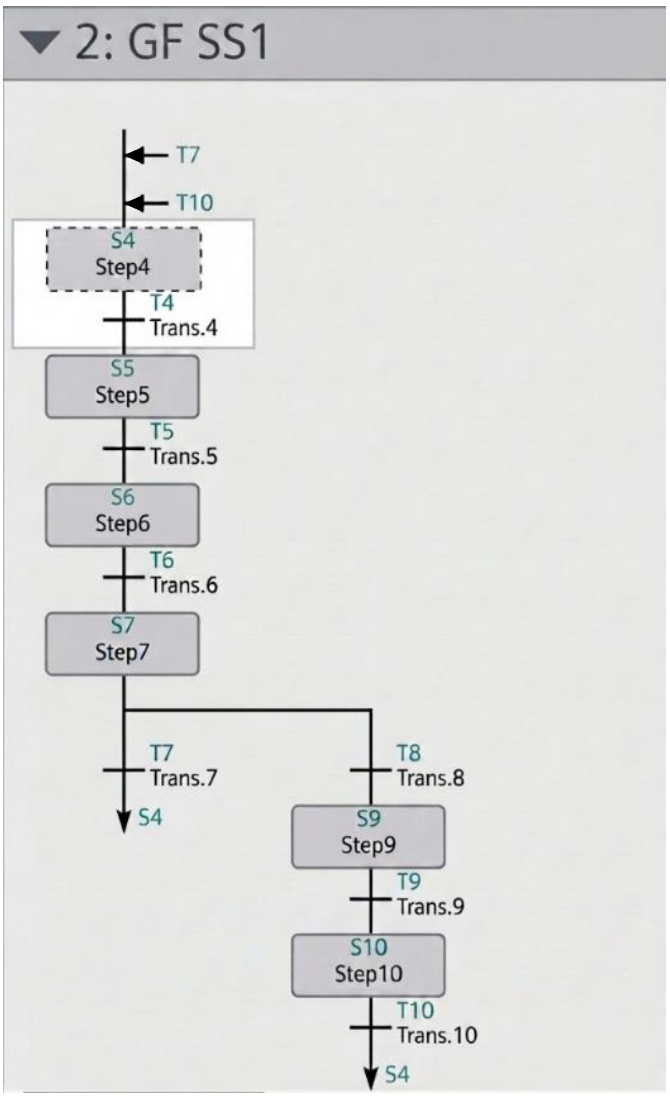
Si le magazine est vide, le bras pivotant retourne à sa position magazine et le voyant du bouton de démarrage s'allume. Le fonctionnement normal reprend ensuite jusqu'à ce qu'une pièce soit insérée dans le magazine.

X10		

12-Tableau 3.10 : L'étape 6 et transition de GF SS-1

Lorsqu'une pièce entre dans le magazine, le cycle de fonctionnement normal peut recommencer.

Le graph de fonctionnement de SS-1 devrait donc ressembler à ceci.



15-Figure 3.2 : Graph de fonctionnement de sous-station 1

Graphe de sécurité de SS-2 :

<table>
<tr>
<td>X11</td>
<td>
S11 - Step11:
<table>
<tr><th>Interlock</th><th>Evénement</th><th>Identificateur</th><th>Action</th></tr>
<tr><td></td><td>S1</td><td>OFF</td><td>#Step14</td></tr>
<tr><td></td><td>S1</td><td>OFF</td><td>#Step15</td></tr>
<tr><td></td><td>S1</td><td>OFF</td><td>#Step16</td></tr>
<tr><td></td><td>S1</td><td>OFF</td><td>#Step17</td></tr>
<tr><td></td><td>S1</td><td>OFF</td><td>#Step18</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>S</td><td>"Stop2"</td><td>"Stop2"</td><td>%Q1.0</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>R</td><td>"Start2"</td><td>"Start2"</td><td>%Q0.7</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td><ajouter></td><td></td></tr>
</table>
</td>
<td>
T11 - Trans11:
%I1.7 "STOP2_bouton" %I1.5 "RESET2_bouton"
</td>
</tr>
<tr>
<td>X12</td>
<td>
S12 - Step12:
<table>
<tr><th>Interlock</th><th>Evénement</th><th>Identificateur</th><th>Action</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td>S</td><td>"Reset2"</td><td>"Reset2"</td><td>%Q0.6</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>R</td><td>"Transporteur"</td><td>"Tran...</td><td>%Q1.1</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>R</td><td>"Vérine2"</td><td>"Véri...</td><td>%Q1.2</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td><ajouter></td><td></td></tr>
</table>
</td>
<td>
T12 - Trans12:
%I2.3 "Trans_basse" %I0.4 "Vérine1_rentre" %I1.6 "START2_bouton"
%I1.7 "STOP2_bouton" #Step12.U > Time t#10S
</td>
</tr>
</table>

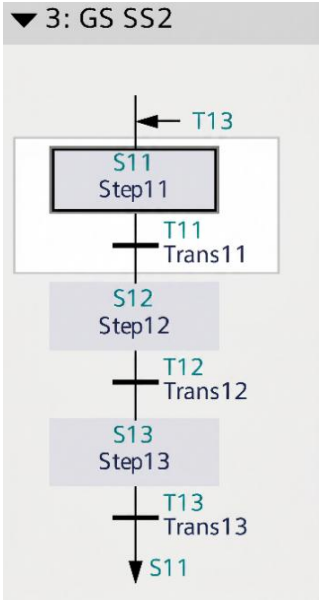
13-Tableau 3.11 : L'étape 1 et 2 et transitions de GS SS-2

Comme pour le premier graph de sécurité de SS-1, nous devons désactiver toutes les étapes du graph fonctionnel de SS-2. Lorsque nous cliquons sur le bouton de réinitialisation, si le transporteur est levé, il descend, si la Vérin est sortie, il rentre.

<table>
<tr>
<td>X13</td>
<td>
S13 - Step13:
<table>
<tr><th>Interlock</th><th>Evénement</th><th>Identificateur</th><th>Action</th></tr>
<tr><td></td><td>S1</td><td>ON</td><td>#Step14</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>S</td><td>"Start2"</td><td>"Start2"</td><td>%Q0.7</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>R</td><td>"Stop2"</td><td>"Stop2"</td><td>%Q1.0</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>R</td><td>"Reset2"</td><td>"Reset2"</td><td>%Q0.6</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td><ajouter></td><td></td></tr>
</table>
</td>
<td>
T13 - Trans13:
%I1.7 "STOP2_bouton"
</td>
</tr>
</table>

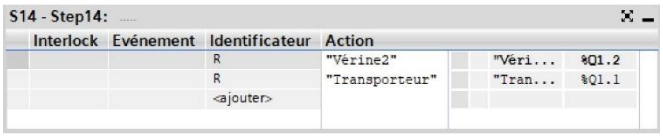
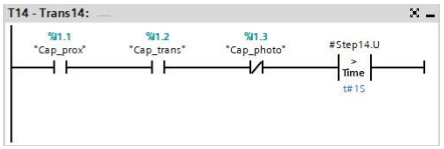
14-Tableau 3.12 : L'étape 3 et transition de GS SS-2

Le graph de sécurité de SS-2 devrait donc ressembler à ceci.



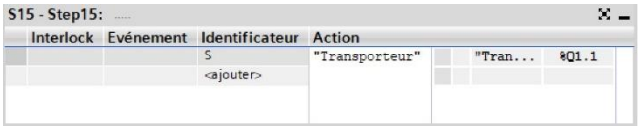
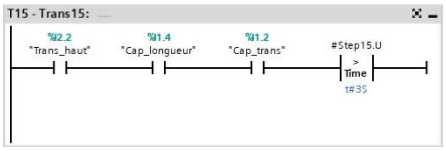
16-Figure 3.3 : Graph de sécurité de sous-station 2

Graph de fonctionnement de SS-2 :

X14		

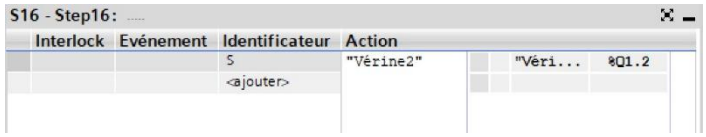
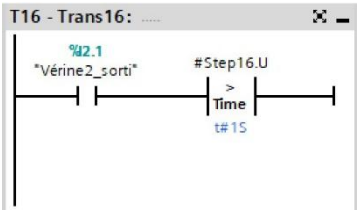
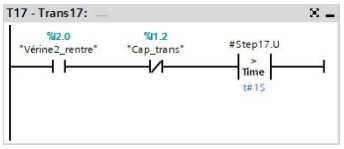
15-Tableau 3.13 : L'étape 1 et transition de GF SS-2

Pour que la deuxième sous-station fonctionne, certaines conditions doivent être réunies : le transporteur doit être en position basse et la Vérin ne doit pas être sorti, les capteurs doivent détecter une pièce sur le transporteur et le capteur photoélectrique ne doit pas détecter le bras rotatif du côté aval.

X15		

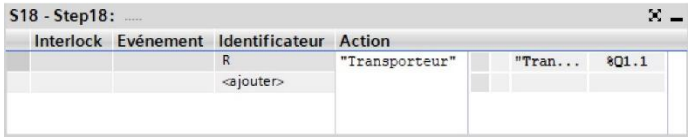
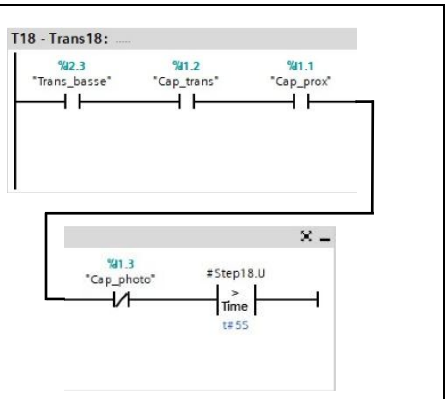
16-Tableau 3.14 : L'étape 2 et transition de GF SS-2

Le transporteur monte et le capteur de hauteur détecte la pièce sur le transporteur, se préparant pour l'étape suivante.

X16		
X17		

17-Tableau 3.15 : L'étape 3 et 4 et transitions de GF SS-2

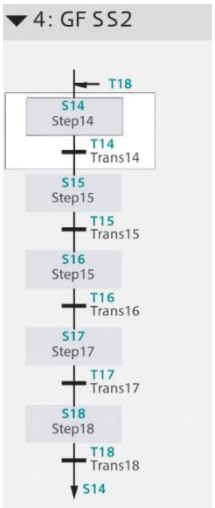
Le bras sort pour pousser la pièce sur le transporteur vers le plan incliné, puis revient. Le capteur relié au transporteur cesse alors de détecter l'absence de pièce

X18		

18-Tableau 3.16 : L'étape 5 et transition de GF SS-2

Quant à la dernière étape, le transporteur redescend et le cycle se répète lorsque les premières conditions du cycle sont remplies.

Le graph de fonctionnement de SS-2 devrait donc ressembler à ceci.



17-Figure 3.4 : Graph de fonctionnement de sous-station 2

3.2 Couplage entre Siemens NX et TIA Portal

3.2.1 Mise en place de la communication : liaison signal directe et OPC UA

Dans un projet de Virtual Commissioning, la communication entre Siemens NX MCD et TIA Portal peut être établie selon deux approches principales : la liaison signal directe et le protocole OPC UA. Ces deux solutions poursuivent le même objectif, à savoir assurer l'échange des états logiques entre l'automate virtuel et le modèle 3D, mais elles diffèrent profondément par leur architecture, leur complexité de mise en œuvre et leur champ d'application.

La liaison signal directe repose sur une interface native entre NX MCD et PLCSIM Advanced. Elle permet à NX d'accéder directement à l'instance de simulation de l'automate virtuel, en environnement local, sans recours à une infrastructure réseau complexe. Cette méthode est particulièrement adaptée aux travaux académiques, aux essais de validation et au développement de jumeaux numériques sur une seule station de travail. Son principal avantage réside dans sa simplicité de configuration, sa rapidité d'exécution et sa très faible latence, ce qui favorise une co-simulation fluide et stable.

À l'inverse, OPC UA constitue une solution plus ouverte et plus universelle. Il s'agit d'un protocole de communication industriel standardisé, fondé sur une architecture client-serveur. Dans ce cas, l'automate ou son environnement de simulation expose les variables du programme sous forme de nœuds accessibles via un serveur OPC UA, tandis que NX MCD agit comme client pour lire et écrire ces données. Cette solution offre une excellente interopérabilité, une meilleure extensibilité à l'échelle industrielle, ainsi que des mécanismes de sécurité avancés, mais elle impose une configuration plus lourde et une latence généralement supérieure à celle d'une liaison directe.

Dans notre travail, nous avons retenu la liaison signal directe. Ce choix se justifie par la nature locale de notre environnement expérimental, par la volonté de réduire la complexité logicielle, et par la nécessité de garantir un échange rapide entre le modèle 3D et l'automate simulé. La liaison directe apparaît donc comme la solution la plus cohérente avec les objectifs du mémoire, notamment pour une validation fonctionnelle précise de la station Distribution du FESTO MPS 500.

Critère	Liaison directe	OPC UA
Principe	Connexion locale native entre NX MCD et PLCSIM Advanced	Communication client-serveur via réseau TCP/IP
Complexité	Faible	Moyenne à élevée
Latence	Très faible	Variable selon le réseau
Portée	Même machine	Locale ou distante
Interopérabilité	Limitée à l'écosystème Siemens	Très élevée
Sécurité	Non prioritaire en local	Chiffrement, certificats, authentification
Usage recommandé	Virtual Commissioning local	Intégration industrielle distribuée

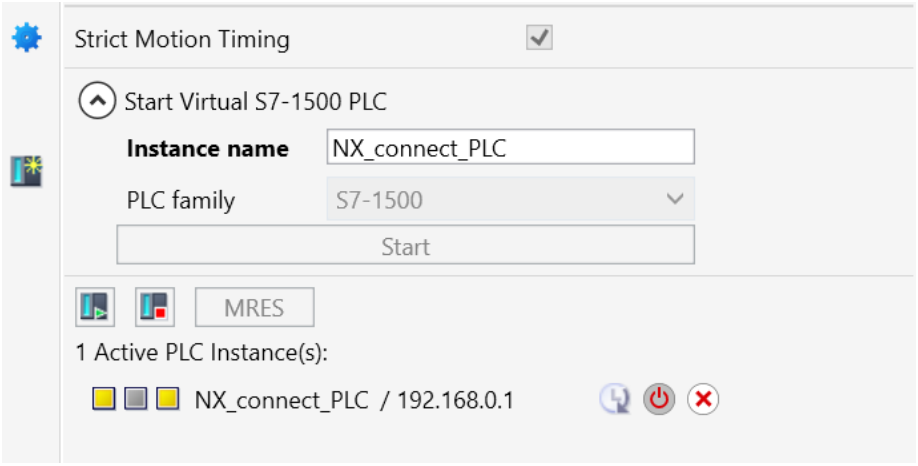
19-Tableau 3.17 : Comparaison entre liaison directe et OPC UA

La procédure de mise en place de la liaison signal directe s'articule en plusieurs étapes successives et interdépendantes.

La première étape consiste à lancer **PLCSIM Advanced** et à créer une instance de simulation correspondant à l'automate configuré dans TIA Portal. Cette instance constitue l'équivalent logiciel de l'automate physique et servira de point d'ancrage pour l'ensemble du couplage.

En parallèle, dans l'environnement **Siemens NX MCD**, les signaux d'entrée/sortie du modèle mécatronique sont définis et nommés. Dans le cadre de ce projet, un signal de liaison dédié, nommé **NX_connect_PLC**, a été créé aussi bien dans NX MCD que dans le programme TIA Portal chargé dans l'instance PLCSIM Advanced. Cette convention de nommage identique entre les deux environnements permet à NX de **reconnaître et d'associer automatiquement** les signaux lors de la configuration du couplage, sans recourir à un mapping manuel.

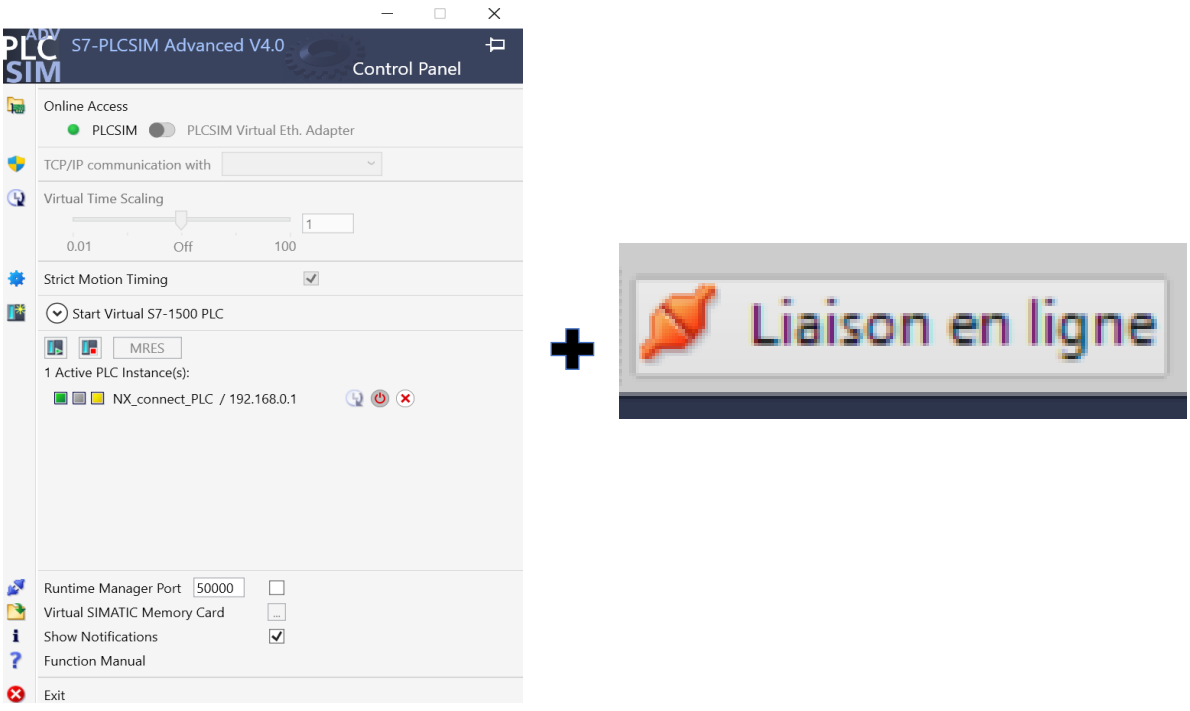
Cliquer : Ouvrir PLCSIM Advanced → écrire le nom de l'instance → cliquer **Start**



18-Figure 3.5 : Interface de PLCSIM-Advanced

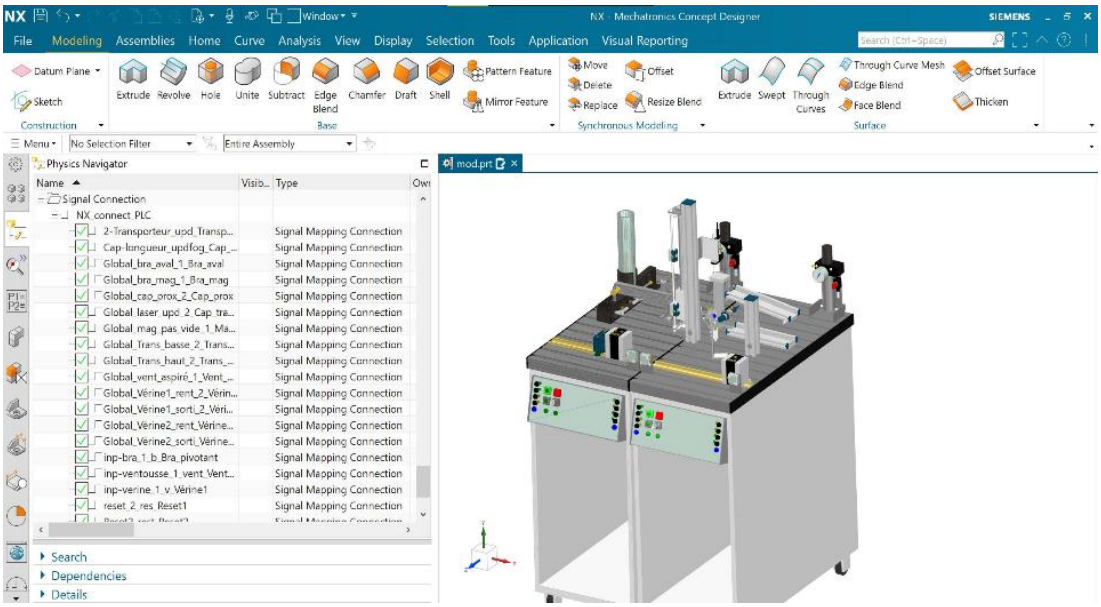
La deuxième étape porte sur la **configuration du programme dans TIA Portal**. Conformément à la logique du couplage, les sorties définies dans NX MCD correspondant aux actionneurs du modèle virtuel sont affectées en tant qu'entrées dans le programme automate de TIA Portal, et réciproquement, les sorties du programme automate constituent les entrées du modèle NX. Cette inversion est fondamentale pour assurer la cohérence du flux de données entre les deux environnements.

Une fois le programme compilé et chargé, la **connexion entre TIA Portal et PLCSIM Advanced** est établie. La réussite de cette liaison est confirmée par l'indicateur d'état qui passe au **vert** dans l'interface de PLCSIM Advanced, signalant que la communication est opérationnelle.



19-Figure 3.6 : Le changement après avoir cliqué sur « Liaison en ligne »

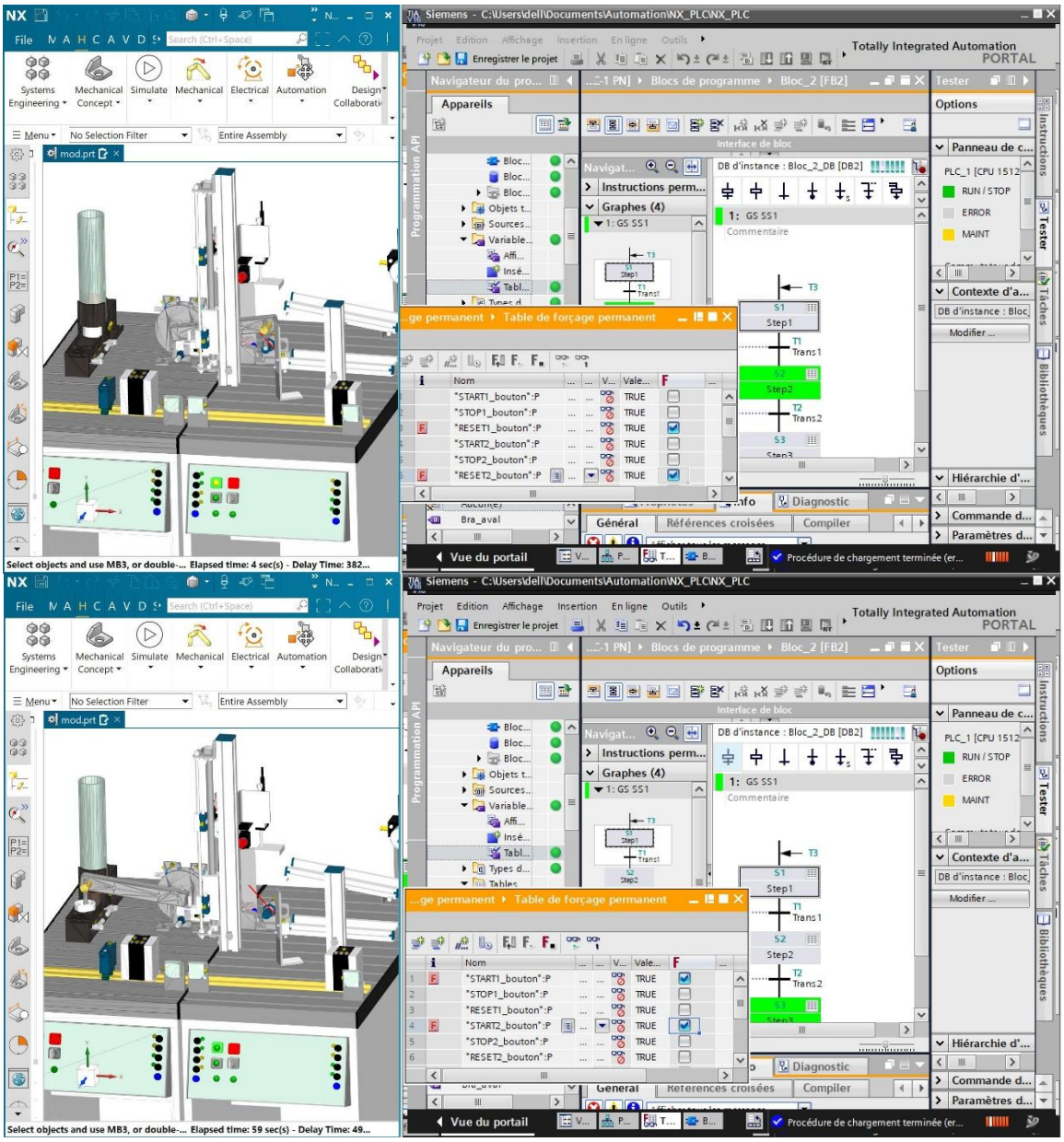
La troisième étape consiste à ouvrir la **configuration externe des signaux dans NX MCD**, où l'utilisateur sélectionne le type de connexion *PLCSIM Advanced*. NX détecte alors automatiquement l'instance disponible sur la machine identifiée grâce au signal **NX_PLC_connect** et l'associe au modèle mécatronique, complétant ainsi le couplage bidirectionnel entre les deux outils.



20-Figure 3.7 : Signal Connection dans NX-MCD

Enfin, la **validation opérationnelle** est réalisée en lançant la simulation dans NX MCD. Une commande **RESET** est d'abord envoyée afin de ramener la station à son état initial, suivie d'une commande **START** pour déclencher le cycle automatique. L'exécution correcte de la séquence de la station Distribution confirme la validité du couplage et constitue la base opérationnelle sur laquelle reposent les opérations de validation fonctionnelle décrites dans les sous-sections suivantes.

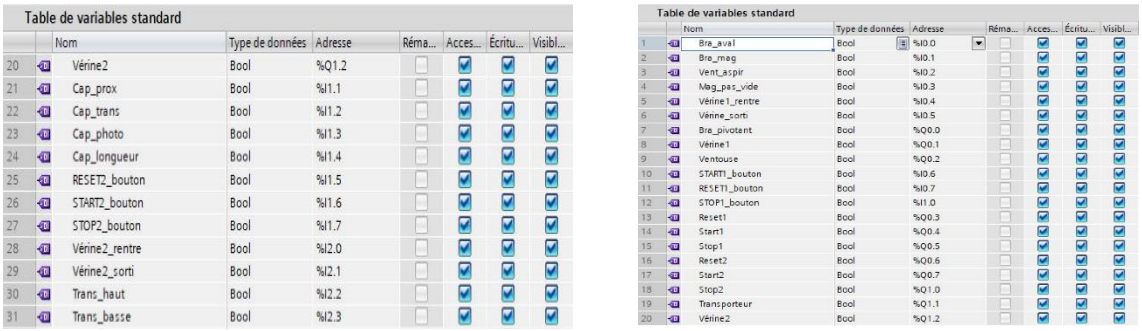
Cliquer : Simulé dans NX → envoyer **RESET** «TIA »→ envoyer **START** «TIA »



21-Figure 3.8 : Contrôle de l'état du système via TIA

3.2.2 Mapping des variables et correspondance des entrées/sorties

Le mapping des signaux constitue l'opération centrale du couplage. Il consiste à établir une correspondance explicite entre les signaux définis dans NX MCD et les variables utilisées dans le programme automate sous TIA Portal. Grâce à cette correspondance, chaque action physique simulée dans le modèle 3D est liée à une variable logique de l'API, et chaque retour capteur du modèle virtuel peut être interprété par le programme de commande comme s'il provenait d'un système réel.



22-Figure 3.9 : Toutes les variables dans TIA

Dans cette architecture, les sorties de l'automate représentent les commandes envoyées vers les actionneurs du modèle. Elles pilotent par exemple l'avance ou le recul d'un vérin. En sens inverse, les entrées de l'automate reçoivent les signaux issus des capteurs virtuels modélisés dans NX MCD, comme les fins de course, la présence de pièce ou la détection d'une position intermédiaire.

Pour garantir la cohérence du système, le mapping doit respecter trois règles fondamentales. Premièrement, la nature des variables doit être compatible dans les deux environnements, par exemple BOOL avec BOOL. Deuxièmement, la direction fonctionnelle doit être correcte : une sortie automate doit commander un actionneur dans MCD, tandis qu'une entrée automate doit recevoir un état capteur en provenance du modèle. Troisièmement, chaque signal doit être lié à une seule variable afin d'éviter tout conflit logique lors de la simulation.

Signal NX	Variable API	Description	Type
Vérin1	%Q0.1	Commande de rentre ou sortie du vérin	BOOL
Ventouse	%Q0.2	Commande de l'aspiration/du libérer la pince	BOOL
Bras_pivotant	%Q0.0	Commande de téléporte au magazine ou aval	BOOL

20-Tableau 3.18 : Exemple de signaux de sortie API vers NX MCD

Signal NX	Variable API	Description	Type
Vérin1_rentre	%I0.4	Fin de course avant du vérin	BOOL
Vérin1_sortie	%I0.5	Fin de course arrière du vérin	BOOL
Mag_pas_vide	%I0.3	Détection de pièce dans le magasin	BOOL
Vent_aspire	%I0.2	Confirmation de l'aspiration de la ventouse	BOOL

21-Tableau 3.19 : Exemple de signaux de retour NX MCD vers API

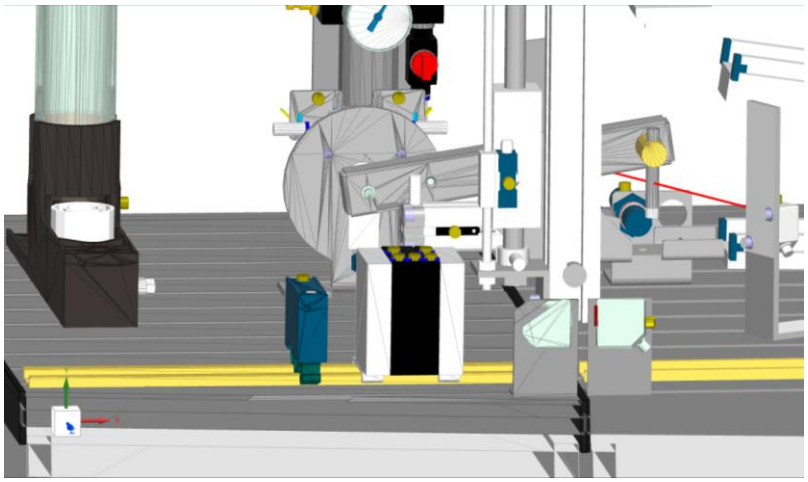
Dans la pratique, le mapping peut être automatique si les noms des variables ont été harmonisés dès la phase de conception. Dans le cas contraire, un mapping manuel doit être réalisé avec rigueur dans l'interface de configuration des signaux de NX MCD. Cette étape est déterminante, car toute erreur de correspondance se traduit directement par un comportement incohérent du jumeau numérique lors de la simulation globale.

3.2.3 Tests de communication et validation du couplage

Une fois la table de mapping établie, il est indispensable de procéder à une phase structurée de tests de communication. Cette phase a pour objectif de vérifier, avant toute co-simulation complète, que l'échange de signaux est correct, stable, bidirectionnel et conforme au comportement attendu du système automatisé.

Le premier niveau de test consiste en une vérification unitaire signal par signal. Chaque sortie de l'automate est forcée manuellement dans PLCSIM Advanced afin d'observer la réaction correspondante dans NX MCD. Par exemple, l'activation d'une sortie dédiée à l'avance du vérin doit provoquer immédiatement le déplacement du mécanisme virtuel associé. De la même manière, l'activation d'un capteur virtuel dans le modèle 3D doit être visible sous forme de changement d'état dans la table des entrées de l'automate simulé.

Le deuxième niveau de test concerne l'enchaînement partiel des séquences fonctionnelles. Il ne s'agit plus seulement de vérifier une réponse isolée, mais de valider un mini-cycle commandé par l'API, par exemple l'éjection d'une pièce suivie du retour du vérin et de la confirmation des fins de course. Cette étape permet de contrôler la cohérence du dialogue entre logique de commande et comportement mécanique simulé.



23-Figure 3.10 : L'état pour que le Vérin sorte dans le cycle

Le troisième niveau porte sur la robustesse du couplage. Il s'agit ici d'évaluer le comportement du système en cas de redémarrage, de perte momentanée de connexion ou de désynchronisation d'état initial. Ces essais permettent d'identifier les limites pratiques de l'architecture choisie et d'améliorer la fiabilité du jumeau numérique avant les simulations globales du chapitre suivant.

Test	Résultat	Observation
Test unitaire des commandes	Validé	Réponse correcte des actionneurs virtuels
Test unitaire des capteurs	Validé	Retour d'état cohérent dans l'API
Séquence partielle	Validé	Enchaînement conforme au GRAFCET
Temps de réponse	Validé	Latence très faible en liaison directe

22-Tableau 3.20 : Les résultats et observations de quelque tests

Les tests réalisés ont montré que la liaison signal directe assure un échange fiable entre l'automate virtuel et le modèle mécatronique, avec un niveau de réactivité suffisant

pour les besoins du Virtual Commissioning. Cette validation intermédiaire est essentielle, car elle conditionne directement la réussite de la simulation globale et la crédibilité du jumeau numérique proposé.

3.2.4 Architecture globale du jumeau numérique

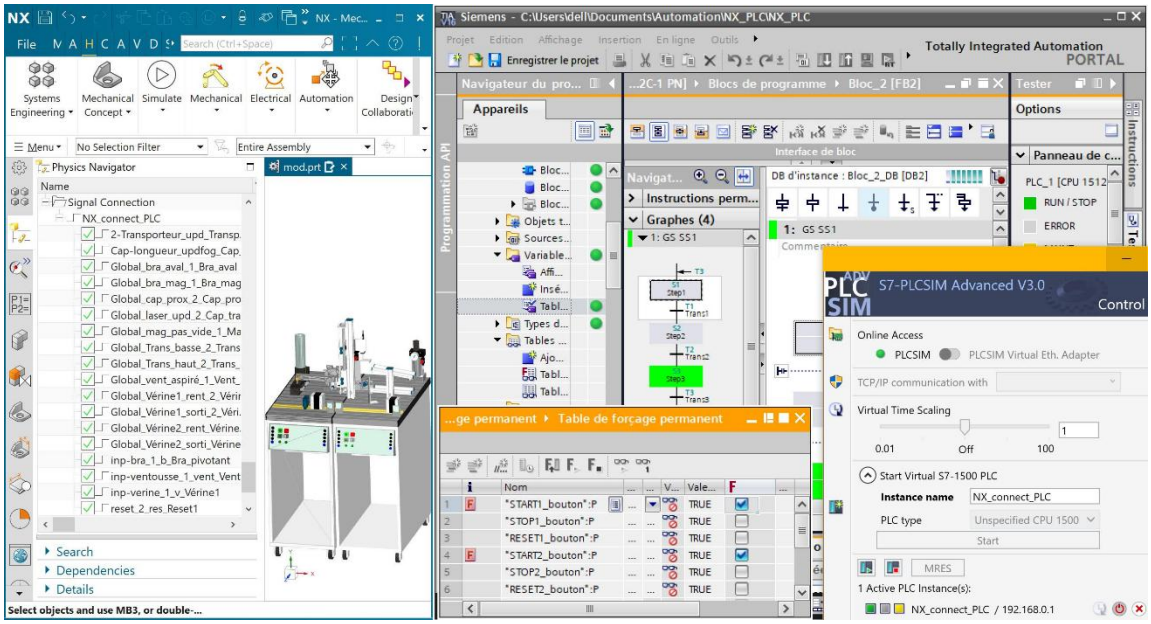
L'architecture globale du jumeau numérique mis en place dans ce travail repose sur l'interaction de trois couches complémentaires : la couche de commande, la couche de communication et la couche de simulation physique. Ensemble, ces trois couches assurent la cohérence entre le comportement logique de l'automate et le comportement mécanique du modèle virtuel.

Signal ⟶ PLCSIM Advanced ⟷ TIA Portal

La première couche correspond à la commande logique développée dans TIA Portal et exécutée dans PLCSIM Advanced. Elle contient le programme automate, le GRAFCET, les conditions de transition, les temporisations et les instructions d'activation des actionneurs. La deuxième couche est assurée par la liaison signal directe, qui transporte en temps réel les états logiques entre l'API simulée et NX MCD. Enfin, la troisième couche est constituée du modèle 3D mécatronique, dans lequel les actionneurs, capteurs, liaisons et mouvements physiques reproduisent le comportement attendu de la station Distribution.

Le fonctionnement global s'effectue en boucle fermée. L'automate virtuel envoie des ordres aux actionneurs du modèle 3D, NX MCD exécute le mouvement correspondant, puis les capteurs virtuels renvoient les états obtenus vers l'automate. Cette rétroaction continue confère au système son caractère de jumeau numérique, car elle permet de tester la logique de commande sur une représentation virtuelle réaliste avant toute mise en service réelle.

Du point de vue scientifique et industriel, cette architecture présente un intérêt majeur. Elle permet non seulement de valider le programme automate sans risque matériel, mais aussi de détecter précocement les incohérences de séquencement, les défauts de synchronisation et les erreurs de logique de commande. En cela, elle s'inscrit pleinement dans l'approche du Virtual Commissioning, qui vise à réduire le temps de mise en service, les coûts d'ajustement sur site et les risques liés au démarrage réel de l'installation.



24-Figure 3.11 : Tous les programmes nécessaires à la simulation

Schéma textuel simplifié de l'architecture :

TIA Portal / PLCSIM Advanced (commande logique)

↓ sorties Q

Liaison signal directe / table de mapping

↓ commandes actionneurs

NX MCD (modèle 3D mécatronique)

↑ retours capteurs

Liaison signal directe / table de mapping

↑ entrées I

TIA Portal / PLCSIM Advanced

3.3 Simulation Globale et Validation du Jumeau Numérique

3.3.1 Exécution du cycle complet de la station

L'exécution du cycle complet de co-simulation constitue la première étape de la validation fonctionnelle. Elle repose sur le démarrage simultané de l'instance PLCSIM Advanced, chargée d'exécuter le programme automate de la station Distribution, et de la simulation physique sous NX MCD, de manière à ce que les deux environnements

procèdent à un échange de signaux en temps réel au travers de la liaison directe configurée en section 3.2. La boucle de co-simulation se trouve ainsi fermée : le programme automate génère les commandes destinées aux actionneurs du modèle tridimensionnel, lequel restitue en retour les états des capteurs que l'automate exploite afin de progresser dans les étapes du GRAFCET.

Le cycle opérationnel de la station Distribution du système FESTO MPS 500 s'articule autour du traitement séquentiel des pièces stockées dans le magasin à empilement, lequel peut contenir jusqu'à huit pièces. Un vérin double effet assure l'éjection individuelle de chaque pièce hors du magasin, tandis que le module Changer, équipé d'un bras à ventouse entraîné par un actionneur semi-rotatif, se charge de la saisie et du transfert de la pièce vers la station aval.

Ce cycle s'articule autour de quatre séquences élémentaires enchaînées de manière conditionnée. La première séquence correspond à la **remise à l'état initial (RESET)** : le bras à ventouse pivote et se positionne du côté opposé au magasin, c'est-à-dire en direction de la station de test, pendant que le vérin d'éjection occupe sa position de repos en recul. La deuxième séquence est la **détection et l'éjection de la pièce** : un capteur optique confirme la présence d'une pièce dans le magasin, après quoi le vérin double effet s'actionne en avance et pousse la pièce hors du magasin, avant de revenir en position initiale, les positions extrêmes étant détectées par des capteurs de proximité. La troisième séquence est la **prise par aspiration pneumatique** : le bras à ventouse pivote en sens inverse vers le côté du magasin, se positionne au-dessus de la pièce éjectée et assure sa préhension par dépression d'air générée selon le principe de Venturi au sein du terminal de distributeurs. La quatrième et dernière séquence est le **transfert vers la station de test** : l'actionneur semi-rotatif fait pivoter le bras entre 180° et 360°, acheminant ainsi la pièce saisie jusqu'au point de transfert de la station de test (Station Testing), avant que la dépression ne soit coupée et que le système ne regagne sa configuration initiale en vue d'entamer un nouveau cycle.

La co-simulation reproduit cet enchaînement de façon continue et autonome, sans nécessiter d'intervention extérieure. L'observation dans NX MCD révèle la succession ordonnée des mouvements du vérin d'éjection, les rotations du bras à ventouse ainsi que les opérations de prise et de dépose par aspiration pneumatique, le tout en parfaite

synchronisation avec les franchissements de transitions observables dans TIA Portal. Cette cohérence dynamique entre les deux environnements démontre la robustesse du couplage mis en place et atteste de la capacité du jumeau numérique à reproduire fidèlement le comportement opérationnel réel de la station Distribution.

3.3.2 Validation fonctionnelle : comparaison comportement réel / simule

La validation fonctionnelle est la phase la plus critique de la démarche. Elle consiste à comparer le comportement du jumeau numérique avec le comportement attendu de la station physique réelle, en s'appuyant sur les spécifications fonctionnelles documentées, les temps de cycle théoriques et les séquences logiques définies dans le cahier des charges. L'objectif est de quantifier l'écart entre la simulation et la réalité, et d'identifier les éventuelles sources de divergence.

Du point de vue de la logique de commande, la validation est complète : chaque transition du GRAFCET s'active correctement en réponse aux signaux retournés par NX MCD, sans état bloquant, sans transition prématurée et sans saut d'étape. Les conditions de démarrage, les conditions de fin de cycle, les réinitialisations et les arrêts d'urgence sont tous testés avec succès.

Du point de vue mécanique, le comportement simulé reproduit fidèlement la cinématique de la station. Quelques écarts résiduels sont néanmoins observés au niveau de la simulation pneumatique, notamment l'absence de la compressibilité de l'air dans le modèle, ce qui conduit à des déplacements légèrement plus linéaires que dans la réalité. À cela s'ajoutent de légères différences au niveau des vitesses, dans la mesure où le modèle ne reflète pas entièrement les variations dynamiques induites par les fluctuations de pression pneumatique réelle et les temps de réponse des distributeurs. Ces limites sont inhérentes à la modélisation mécatronique dans NX MCD et constituent une perspective d'amélioration future.

Critère de validation	Résultat	Observation
Logique séquentielle GRAFCET	Validé	Toutes les transitions correctes
Conditions de démarrage (RESET)	Validé	Bras à ventouse positionné côté station de test
Séquence éjection vérin	Validé	Course et fins de course conformes aux spécifications
Séquence prise par aspiration (bras à ventouse)	Validé	Lors de l'activation, l'aspiration saisit et transfère la pièce correctement
Comportement pneumatique	Partiel	Absence compressibilité air
Écarts de vitesses	Partiel	Partiel Légères différences dues aux fluctuations de pression réelle
Synchronisation temps réel	Validé	Latence < temps de cycle API

23-Tableau 3.21 : Critères de validation et leurs résultats dans le système final

3.3.3 Tests de scénarios : fonctionnement normal et anomalies de simulation identifiées

Au-delà de la validation du comportement nominal présentée aux sections précédentes, l'évaluation de la robustesse et de la complétude d'un jumeau numérique passe nécessairement par une confrontation du modèle à des situations qui sortent du cadre opérationnel standard. Cette phase de tests de scénarios poursuit un double objectif : d'une part, confirmer que le comportement du jumeau numérique en conditions normales est stable, répétable et conforme aux spécifications fonctionnelles de la station ; d'autre part, documenter avec rigueur les limites observées lors de l'exécution de la co-simulation, qu'elles soient d'ordre logiciel, matériel ou inhérentes aux simplifications de modélisation adoptées.

Il convient de souligner que les scénarios investigués dans cette section ont été définis sur la base exclusive des situations effectivement rencontrées et observables dans le cadre de notre environnement expérimental. En l'absence d'un système de commande d'arrêt d'urgence matériel ou d'un dispositif de simulation de défauts capteurs intégré à la maquette disponible, les tests se limitent aux comportements que le jumeau numérique permet de reproduire et d'analyser de manière autonome. Cette délimitation constitue une démarche scientifique rigoureuse : ne valider que ce qui a été effectivement observé et mesuré.

Scénario 1 : Fonctionnement nominal : cycle complet en co-simulation

Le premier scénario, et le seul à être intégralement validé dans notre configuration, porte sur le déroulement du cycle automatique de la station Distribution dans des conditions nominales, c'est-à-dire avec un magasin partiellement chargé (jusqu'à cinq pièces) et une initialisation préalable correctement effectuée.

La procédure de test suit la séquence suivante : activation de l'instance PLCSIM Advanced, lancement de la simulation physique dans NX MCD, envoi de la commande RESET via l'interface TIA Portal afin de ramener tous les actionneurs à leur position initiale, puis activation de la commande START. La co-simulation se déroule ensuite de façon entièrement autonome, le programme automate pilotant le modèle 3D en temps réel au travers de la liaison signal directe.

L'observation du cycle en fonctionnement normal a permis de vérifier les comportements suivants :

– Éjection individuelle de chaque pièce par le vérin double effet (SS-1), avec détection correcte des fins de course avant et arrière par les capteurs de proximité ;
– Pivot du bras à ventouse depuis la position aval vers le côté du magasin, suivi de la prise en charge par dépression pneumatique avec confirmation du signal Vent_aspire
– Rotation de l'actionneur semi-rotatif acheminant la pièce vers le point de transfert de la station de test adjacente, avec lâcher contrôler de la pièce ;

– Retour du bras à la position initiale et relance automatique d'un nouveau cycle si le magasin n'est pas vide (signal Mag_pas_vide = TRUE), ou maintien en attente avec signalisation lumineuse si le magasin est épuisé.

Ce scénario a été reproduit à plusieurs reprises. Le comportement observé s'est révélé stable, répétable et cohérent avec les spécifications fonctionnelles, sans aucun blocage d'étape, dérive de temporisation ni incohérence de signaux. *Ce résultat valide l'intégration globale du jumeau numérique et confirme la fiabilité du couplage NX MCD – PLCSIM Advanced dans les conditions opérationnelles nominales.*

Scénario 2 : Surcharge du magasin : dépassement du nombre de pièces admissible

La station Distribution du FESTO MPS 500 est conçue pour fonctionner avec un magasin à empilement pouvant contenir jusqu'à huit pièces. Cependant, lors des essais conduits sur le jumeau numérique, il a été constaté que le chargement du magasin avec un nombre de pièces supérieur à cinq génère un phénomène de surcharge mécanique qui compromet le bon déroulement du cycle.

La cause physique de ce dysfonctionnement réside dans la masse cumulée des pièces empilées. Lorsque six pièces ou davantage sont présentes, le poids exercé sur la pièce inférieure celle que le vérin d'éjection doit extraire individuellement dépasse la force de poussée nominale du vérin SS-1. Il en résulte une dispersion des pièces dans le magasin et une incapacité du vérin à assurer une éjection propre et contrôlée, rendant la prise par aspiration du bras à ventouse impossible.

Ce comportement, bien que reproductible dans la simulation physique de NX MCD, ne constitue pas un scénario de défaut programmatique : il est la conséquence directe d'une contrainte mécanique inhérente au dimensionnement de l'actionneur et non d'une erreur logique dans le programme automate. Par conséquent, aucune gestion spécifique de ce cas n'a été implémentée dans le GRAFCET. **La règle opérationnelle retenue est la suivante : le magasin ne doit pas être chargé avec plus de cinq pièces**

simultanément. Cette contrainte est documentée comme limite opérationnelle du jumeau numérique dans sa configuration actuelle.

Scénario 3 : Défaut de temporisation du bras à ventouse : relâchement prématuré de la pièce

Le troisième scénario observé est lié non pas à une erreur de programmation, mais à une contrainte de performance propre à l'environnement de co-simulation. Il concerne le comportement du bras à ventouse lors de la séquence de transfert de la pièce.

Le phénomène observé est le suivant : lors de la rotation du bras pour acheminer la pièce vers la station aval, un délai résiduel lié aux performances de la machine hôte peut provoquer un décalage temporel entre l'ordre logique de maintien de l'aspiration et l'exécution physique du mouvement dans NX MCD. Ce délai, bien que de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes, peut être suffisant pour que la ventouse entame son retour alors que l'aspiration n'a pas encore été complètement coupée. La pièce, partiellement adhérente à la ventouse, se retrouve alors larguée en position intermédiaire, c'est-à-dire à mi-chemin entre le magasin et le point de dépose.

Ce relâchement prématuré ne constitue cependant pas un événement isolé : il déclenche une séquence d'anomalies en cascade affectant la station de test adjacente. En effet, au moment où la pièce passe brièvement par la zone de dépose même de façon non contrôlée le capteur de présence de la station de test détecte fugitivement sa présence et enregistre un signal de détection. Ce signal, valide du point de vue logique pour l'automate de la station de test, déclenche l'activation du système de levage : le mécanisme monte en position haute, en attente de la pièce à soumettre aux rouleaux de test. Or, la pièce ayant été recueillie et relarguée par le bras à ventouse avant d'atteindre le point de dépose nominal, le système de levage se retrouve en position haute sans qu'aucune pièce ne soit présente dans le logement de test.

Il en résulte un blocage fonctionnel de la station de test : le système de levage maintient sa position haute indéfiniment, dans l'attente d'une pièce qui n'arrivera pas. Pendant ce temps, la station Distribution continue son cycle et dépose les pièces suivantes au point de transfert, sans que le mécanisme de levage ne soit en mesure de les

réceptionner correctement, celui-ci n'ayant pas effectué son retour en position basse. Ce blocage en cascade illustre la sensibilité de l'architecture de co-simulation aux délais temporels : une anomalie de quelques dizaines de millisecondes dans la station amont suffit à désynchroniser l'ensemble de la chaîne de production simulée.

Ce phénomène est directement imputable aux ressources de calcul disponibles sur la machine utilisée pour la co-simulation, et non à une incohérence logique dans le programme automate ou dans la configuration du jumeau numérique. Dans un environnement de simulation à performances élevées station de travail dédiée ou serveur de calcul ce type d'artefact temporel n'apparaît pas. Il s'agit donc d'une *limite matérielle contextuelle* qui n'affecte pas la validité conceptuelle du jumeau numérique, mais qui doit être documentée honnêtement afin de ne pas induire en erreur lors de l'interprétation des résultats. La portée de cet artefact dépasse néanmoins le cadre de la station Distribution seule, dans la mesure où ses effets en cascade sur la station de test ont été clairement observés et documentés.

Scénario 4 : Démarrage à magasin vide : gestion du cycle non initié

Le quatrième et dernier scénario testé porte sur la robustesse du programme automate face à un démarrage du cycle alors que le magasin est entièrement vide. Ce cas peut survenir lorsque l'opérateur active la commande START sans avoir préalablement chargé de pièces, ou lorsque le dernier cycle a épuisé l'ensemble du stock disponible.

Dans la station Distribution réelle, l'absence de pièce dans le magasin est détectée par le capteur de présence (Mag_pas_vide). Lorsque ce signal est à l'état FALSE, le programme automate ne doit pas initier de cycle, car le bras à ventouse ne trouverait aucune pièce à saisir, ce qui entraînerait une prise à vide et un transfert d'un objet inexistant vers la station aval.

Le test a été réalisé en lançant la commande START alors que le magasin était vide dans le modèle NX MCD. Le comportement observé est parfaitement conforme aux attentes : **l'automate maintient la station à l'étape initiale X2 du GRAFCET, sans**

initier aucun mouvement. Le cycle reste suspendu en attente de la présence d'une pièce signalée par le capteur Mag_pas_vide. Dès l'introduction d'une pièce dans le magasin (simulée par le passage du signal à TRUE) le programme reprend automatiquement le cycle au démarrage, sans nécessiter de nouvelle commande de l'opérateur.

Ce comportement valide la robustesse de la logique de commande face à cette situation opérationnelle fréquente, et confirme que le GRAFCET intègre correctement la gestion des états de non-disponibilité du stock.

Tableau récapitulatif des scénarios testés :

Scénario testé	Cause identifiée	Comportement observé dans le jumeau numérique	Résultat
Fonctionnement normal (cycle nominal)	Présence d'au plus 5 pièces dans le magasin, démarrage système conformément à la procédure d'initialisation	Cycle complet exécuté de manière ordonnée et répétable : éjection par vérin, saisie par aspiration, transfert, dépose	Validé
Surcharge du magasin (> 3 pièces)	Présence de plus de cinq pièces engendrant une contrainte de masse excessive sur le vérin d'éjection SS-1	Dispersion des pièces et incapacité du vérin à éjecter individuellement chaque pièce comportement non nominalisable dans la simulation actuelle	Non applicable (limite matérielle)
Défaut de temporisation du bras à ventouse	Délai résiduel imputable aux performances de la machine hôte, induisant un relâchement prématuré de la pièce en cours de transfert	La pièce reste partiellement adhérente à la ventouse lors du retour du bras, puis est larguée en position intermédiaire. Le capteur	Non applicable (contrainte matérielle)

Scénario testé	Cause identifiée	Comportement observé dans le jumeau numérique	Résultat
		de présence de la station de test détecte fugitivement la pièce et déclenche le mécanisme de levage, lequel monte en position haute sans trouver de pièce ; la station de test se retrouve bloquée en attente, perturbant les cycles suivants	
Démarrage à magasin vide	Envoi de la commande START alors que le magasin ne contient aucune pièce, rendant la préhension par aspiration impossible	Système maintenu à l'étape initiale du GRAFCET : aucun cycle n'est initié tant que le capteur de présence (Mag_pas_vide) ne signale pas la présence d'une pièce	Validé (comportement conforme)

24-Tableau 3.22 : Les différents scénarios

3.3.4 Analyse des performances et des apports du jumeau numérique

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de ce projet a été conduit **intégralement en environnement virtuel**, sans recours à la station physique réelle du FESTO MPS 500. Le jumeau numérique développé constitue ainsi non pas un outil de correction a posteriori, mais un *cadre de développement et de validation en simulation*, dans lequel le programme automate a été conçu, testé et affiné avant tout contact avec la machine. Cette démarche illustre concrètement les deux apports fondamentaux du Virtual Commissioning : la réduction du temps de mise en service et la détection précoce des comportements limites.

Il convient toutefois de situer précisément la portée de cette validation. Le modèle de co-simulation reproduit *fidèlement le comportement logique et cinématique* de la station Distribution, mais ne prétend pas à une équivalence physique totale avec le système réel. Certains paramètres tels que les vitesses exactes des actionneurs, les dynamiques pneumatiques précises, ou les seuils fins de détection des capteurs de fin de course n'ont pas été entièrement modélisés, faute de données constructeur exhaustives. De ce fait, un déploiement direct du programme sur la station réelle ne garantirait pas un fonctionnement sans ajustements : des écarts résiduels entre le comportement simulé et le comportement physique sont à anticiper, notamment sur les temporisations et les seuils de capteurs.

Par ailleurs, il est important de souligner que **aucun test sur la station physique réelle n'a pu être réalisé** dans le cadre de ce projet. Ce choix est contraint par la nature même du contexte académique : la station FESTO MPS 500 constitue un équipement coûteux dont la mise à disposition n'était pas garantie, et toute expérimentation incorrecte sur le matériel réel aurait présenté un risque d'endommagement inacceptable. La démarche adoptée validation en simulation uniquement constitue donc à la fois une nécessité pratique et une démonstration de l'intérêt du Virtual Commissioning comme outil de préparation à la mise en service réelle.

a) Réduction du temps de mise en service

Le fait d'avoir développé et testé l'intégralité du programme automate en simulation signifie que, lors d'un éventuel déploiement sur la station physique réelle, **la phase de mise en service pourra s'appuyer sur un programme déjà structuré et éprouvé en conditions virtuelles**. Le GRAFCET, les temporisations et les conditions de transition ont été vérifiés sur un modèle représentatif du système : les principaux risques de dysfonctionnement logique sont ainsi identifiés et corrigés en amont.

Cette approche contraste avec la mise en service traditionnelle, dans laquelle le programme est généralement écrit puis débogué directement sur la machine, avec les risques mécaniques, les mobilisations d'équipement et les délais d'intervention que cela

implique. Le jumeau numérique substitue à cette phase une validation numérique préalable, plus rapide, sans contrainte horaire et reproductible à volonté. Des ajustements fins sur les temporisations et les paramètres capteurs resteront néanmoins probablement nécessaires lors du déploiement physique effectif.

b) Détection précoce des comportements limites

Le second apport réside dans la capacité du jumeau numérique à faire émerger des **situations non nominales que l'analyse statique du GRAFCET ne permet pas d'anticiper**. Plusieurs comportements limites ont été identifiés et documentés au cours des essais de simulation :

– **La contrainte de surcharge du magasin** (au-delà de cinq pièces) a été identifiée en simulation, définissant une règle opérationnelle à prendre en compte lors de la mise en service réelle ;

– **Le comportement du système au démarrage avec un magasin vide** a été observé et validé en simulation : le programme maintient correctement la station en attente sans initier de cycle à vide ;

– **L'interaction en cascade entre la station Distribution et la station de test** provoquée par une détection transitoire liée aux artefacts de temporisation a été observée et documentée, constituant une information précieuse pour anticiper ce type de dysfonctionnement avant tout déploiement réel.

Ces observations ne constituent pas des défauts du programme automate, mais des *limites opérationnelles identifiées en simulation* qui, sans le jumeau numérique, n'auraient pu être anticipées qu'au moment de la mise en service réelle. Leur transposition exacte au comportement de la station physique reste à confirmer expérimentalement.

Apport attendu	Ce que le jumeau numérique a permis de réaliser	Valeur pour la mise en service réelle future
Réduction du temps de mise en service	Développement et validation du programme automate en environnement virtuel, couvrant les comportements nominaux et les limites opérationnelles identifiables en simulation	Le programme est fonctionnellement éprouvé en simulation une phase de mise en service réelle reste nécessaire, mais elle s'effectuera avec un programme déjà structuré, réduisant les itérations de débogage sur site
Détection précoce des comportements limites	Identification en simulation des limites opérationnelles : surcharge du magasin, démarrage à vide, interaction inter-stations liée aux artefacts de temporisation	Ces comportements sont documentés et anticipés avant tout contact avec la machine réelle ; des ajustements fins demeurent attendus lors du déploiement physique effectif

25-Tableau 3.23 : Les limites opérationnelles

En définitive, le jumeau numérique développé démontre qu'il est possible de conduire une validation logique et fonctionnelle approfondie d'un système automatisé industriel *sans solliciter la machine physique*. Si une équivalence parfaite avec le comportement réel ne peut être garantie en l'absence de tests sur la station physique, les apports en termes de structuration du programme, de réduction des risques de débogage sur site et d'anticipation des comportements limites confirment la pertinence de l'approche Virtual Commissioning dans le contexte de l'Industrie 4.0.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le contexte de la transformation numérique industrielle et de l'émergence des technologies de l'Industrie 4.0, où le concept de jumeau numérique occupe aujourd'hui une place essentielle dans l'optimisation, la simulation et la validation des systèmes automatisés industriels.

L'objectif principal de ce projet était de développer un jumeau numérique de la station Distribution du système FESTO MPS 500 afin de reproduire virtuellement le comportement réel de la station et de valider son fonctionnement avant une éventuelle mise en service physique. Ce travail nous a permis d'aborder plusieurs domaines complémentaires tels que la conception assistée par ordinateur, la simulation mécatronique, l'automatisation industrielle ainsi que les communications industrielles modernes.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été menée afin de comprendre les principes fondamentaux du jumeau numérique, du virtual commissioning et des technologies associées à l'Industrie 4.0. Cette étude nous a permis de mieux comprendre les enjeux liés à la digitalisation des systèmes industriels modernes ainsi que les avantages offerts par les environnements de simulation virtuelle dans les processus de développement et de validation industrielle. Nous avons également présenté la station Distribution du FESTO MPS 500 ainsi que les différents outils logiciels utilisés tout au long du projet, notamment Siemens NX, le module Mechatronics Concept Designer, TIA Portal, PLCSIM Advanced ainsi que le protocole de communication OPC UA.

Dans la deuxième partie du travail, nous avons réalisé la modélisation CAO 3D de la station Distribution à partir du modèle fourni par FESTO. Après l'importation et la restructuration des différents composants dans Siemens NX, nous avons configuré l'environnement mécatronique dans le module MCD en définissant les corps Rigids, les liaisons cinématiques, les collision bodies, les capteurs virtuels ainsi que les différents actionneurs du système. Cette étape a permis d'obtenir un modèle dynamique capable de reproduire fidèlement les mouvements et interactions observés dans le système réel. La configuration des différents mécanismes nous a également permis de mieux comprendre le comportement physique et mécanique de la station Distribution.

Dans le troisième chapitre, nous avons développé le programme de commande de la station sous TIA Portal en utilisant un automate virtuel via PLCSIM Advanced. Ensuite, une communication OPC UA a été établie entre le modèle virtuel développé dans NX/MCD et le programme automate afin de réaliser une co-simulation complète en boucle fermée. Cette communication a permis l'échange des données entre les capteurs virtuels et les actionneurs simulés, garantissant ainsi une synchronisation correcte entre le comportement mécanique et la logique de commande. Les tests réalisés ont montré que le système simulé reproduit correctement les séquences de fonctionnement de la station réelle, ce qui confirme la validité et l'efficacité du jumeau numérique développé. Les résultats obtenus au cours de ce projet mettent clairement en évidence les avantages du virtual commissioning dans le domaine industriel. En effet, cette approche permet de détecter les erreurs de conception et de programmation avant la phase de mise en service réelle, ce qui contribue à réduire les coûts, les délais de développement ainsi que les risques techniques liés aux systèmes automatisés. Le jumeau numérique constitue également un outil performant pour les activités de formation, de maintenance, de supervision et d'optimisation des processus industriels modernes.

Au-delà des résultats techniques obtenus, ce projet nous a permis d'acquérir des compétences pratiques importantes dans plusieurs domaines technologiques tels que la modélisation 3D, la simulation mécatronique, la programmation des automates industriels, les réseaux industriels ainsi que les méthodes modernes de validation virtuelle des systèmes automatisés. Malgré les résultats satisfaisants obtenus, certaines perspectives d'amélioration peuvent être envisagées dans des travaux futurs. Il serait intéressant d'intégrer une interface de supervision industrielle, d'ajouter des fonctions de maintenance prédictive basées sur l'intelligence artificielle ou encore d'étendre le jumeau numérique à l'ensemble des stations du FESTO MPS 500 afin de créer une ligne de production virtuelle complète et totalement interconnectée. Enfin, ce projet confirme l'importance croissante des technologies numériques dans le secteur industriel moderne et montre que le jumeau numérique représente aujourd'hui une solution innovante et incontournable dans la conception, la validation et l'optimisation des systèmes automatisés intelligents de l'Industrie 4.0.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] M. Grieves, "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," White Paper, Florida Institute of Technology, 2014.

[2] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Eds., Springer, 2017, pp. 85–113.

[3] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, Apr. 2019.

[4] S. Boschert and R. Rosen, "Digital Twin The Simulation Aspect," in Mechatronic Futures, P. Hehenberger and D. Bradley, Eds., Springer, 2016, pp. 59–74.

[5] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," IEEE Access, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020.

[6] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.

[7] A. M. Madni, C. C. Madni, and S. D. Lucero, "Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering," Systems, vol. 7, no. 1, p. 7, 2019.

[8] Y. Lu et al., "Digital Twin-driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues," Robot. Comput.-Integr. Manuf., vol. 61, p. 101837, Feb. 2020.

[9] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios," in Proc. 49th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci. (HICSS), 2016, pp. 3928–3937.

[10] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective," IEEE Access, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020.

[11] R. Söderberg, K. Wärmefjord, J. S. Carlson, and L. Lindkvist, "Toward a Digital Twin for Real-Time Geometry Assurance in Individualized Production," CIRP Ann., vol. 66, no. 1, pp. 137–140, 2017.

[12] Y. Liu, L. Zhang, Y. Yang, L. Zhou, L. Ren, F. Wang, R. Liu, Z. Pang, and M. J. Deen, "A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin," IEEE Access, vol. 7, pp. 49088–49101, 2019.

[13] S. Venkatesan, C. Manickavasagam, M. Tengenkai, and N. Vijayalakshmi, "Health Monitoring and Prognosis of Electric Vehicle Motor Using IoT-Enabled Digital-Twin," IET Electr. Power Appl., vol. 13, no. 9, pp. 1346–1354, 2019.

[14] C. Zhuang, J. Liu, and H. Xiong, "Digital Twin-Based Smart Production Management and Control Framework for the Complex Product Assembly Shop-Floor," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 96, no. 1–4, pp. 1149–1163, 2018.

[15] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. P. Moreira, and P. Leitão, "Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges," in Proc. 17th IEEE Int. Conf. Ind. Informat. (INDIN), 2019, pp. 721–726.

[16] G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira, and D. B. Espindola, "Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange," IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 30, pp. 12–17, 2016.

[17] P. Aivaliotis, K. Georgoulias, Z. Arkouli, and S. Makris, "Methodology for Enabling Digital Twin Using Advanced Physics-Based Modelling in Predictive Maintenance," Procedia CIRP, vol. 81, pp. 417–422, 2019.

[18] P. Hoffmann, B. Maksoud, and G. S. Wirth, "Virtual Commissioning of Manufacturing Systems A Review and New Approaches for Simplification," in Proc. 9th IEEE/IAS Int. Conf. Ind. Appl. (INDUSCON), 2010, pp. 1–6.

[19] S. M. Z. Kazmi, "Virtual Commissioning of a Mechatronic System Using Digital Twin Approach," M.S. thesis, Tampere University, Finland, 2019.

[20] M. Oppelt, M. Wolf, L. Urbas, G. Simon, J. Rey, and C. Ullrich, "Integrated Simulation within the Engineering Workflow: Influences and Effects on the Lifecycle of a Process Plant," in Proc. IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Factory Autom. (ETFA), 2014, pp. 1–8.

[21] E. Negri, L. Fumagalli, and M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-Based Production Systems," Procedia Manuf., vol. 11, pp. 939–948, 2017.

[22] M. G. Mehrabi, A. G. Ulsoy, and Y. Koren, "Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing," J. Intell. Manuf., vol. 11, no. 4, pp. 403–419, 2000.

[23] L. Monostori et al., "Cyber-Physical Systems in Manufacturing," CIRP Ann., vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016.

[24] S. Anticipic, B. Suceska, and M. Grgic, "Co-simulation of Pneumatic and Control Systems in Mechatronics Design," in Proc. Int. Conf. Mech. Eng. (ISME), 2015, pp. 1–6.

[25] C. Faller and D. Feldmüller, "Industry 4.0 Learning Factory for Regional SMEs," Procedia CIRP, vol. 32, pp. 88–91, 2015.

[26] S. Cavalieri and G. Salafia, "A Model for Predictive Maintenance Based on Asset Administration Shell," Sensors, vol. 20, no. 21, p. 6028, 2020.

[27] J. Lange, F. Iwanitz, and T. J. Burke, OPC: From Data Access to Unified Architecture, 4th ed. Berlin: VDE Verlag, 2010.

Résumé

Ce mémoire présente le développement d'un jumeau numérique de la station Distribution du système FESTO MPS 500 dans le cadre de l'Industrie 4.0 et du virtual commissioning. Le travail réalisé consiste à concevoir un environnement virtuel capable de reproduire le comportement réel de la station automatisée afin de tester et valider son fonctionnement avant la mise en service physique. La modélisation 3D de la station a été effectuée sous Siemens NX, suivie de la configuration de la simulation mécatronique dans le module MCD. Le programme de commande a ensuite été développé sous TIA Portal avec PLCSIM Advanced afin d'assurer la synchronisation entre le modèle virtuel et la logique de commande. Le jumeau numérique obtenu permet de simuler les différents mouvements, les capteurs ainsi que les actionneurs de la station Distribution. Les résultats obtenus montrent l'importance du jumeau numérique dans la réduction des erreurs, l'amélioration de la fiabilité des systèmes automatisés et l'optimisation des processus industriels modernes.

Mots-clés : Jumeau numérique, Industrie 4.0, Siemens NX, MCD, TIA Portal, PLCSIM Advanced, Virtual Commissioning, FESTO MPS 500.

Abstract

This thesis presents the development of a digital twin for the Distribution Station of the FESTO MPS 500 system within the context of Industry 4.0 and virtual commissioning. The work consists of creating a virtual environment capable of reproducing the real behavior of the automated station in order to test and validate its operation before physical commissioning. The 3D modeling of the station was carried out using Siemens NX, followed by the configuration of the mechatronic simulation in the MCD module. The control program was then developed using TIA Portal with PLCSIM Advanced to ensure synchronization between the virtual model and the control logic. The developed digital twin makes it possible to simulate the different movements, sensors, and actuators of the Distribution Station. The obtained results demonstrate the importance of digital twin technology in reducing errors, improving the reliability of automated systems, and optimizing modern industrial processes.

Keywords: Digital Twin, Industry 4.0, Siemens NX, MCD, TIA Portal, PLCSIM Advanced, Virtual Commissioning, FESTO MPS 500.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى تطوير توأم رقمي لمحطة التوزيع الخاصة بنظام FESTO MPS 500 في إطار الصناعة 4.0 والتشغيل الافتراضي. تمثل هذه المحطة نظامًا آليًا يُستخدم في عمليات المناولة والتوزيع داخل الأنظمة الصناعية التعليمية والصناعية الحديثة. يهدف المشروع إلى إنشاء بيئة افتراضية قادرة على محاكاة السلوك الحقيقي للمحطة من أجل اختبار والتحقق من صحة نظام التحكم قبل مرحلة التشغيل الفعلي. تم إنجاز النمذجة ثلاثية الأبعاد للمحطة باستعمال برنامجSiemens NX ، ثم إعداد المحاكاة الميكاترونية داخل بيئةMCD ، بالإضافة إلى تطوير برنامج التحكم باستخدام TIA Portal و PLCSIM Advanced.يسمح التوأم الرقمي المطور بمحاكاة الحركات المختلفة، الحساسات، والمشغلات الخاصة بمحطة التوزيع. وقد أظهرت النتائج أهمية تقنية التوأم الرقمي في تقليل الأخطاء، تحسين موثوقية الأنظمة الصناعية، والمساهمة في تطوير وتحسين أداء الأنظمة الآلية الحديثة.

الكلمات المفتاحية: التوأم الرقمي، الصناعة 4.0، Siemens NX، MCD، TIA Portal، PLCSIM Advanced، التشغيل الافتراضي، FESTO MPS 500.