



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique

Filière : Génie Industriel

Projet de Fin d'Etudes de Master
Spécialité : Ingénierie de la production

Intitulé :

**Implémentation d'un Digital Twin des stations commandées par
automates de la MPS500**

Présenté par :

Younes ELGHAZI

Abdelkrim Ramzi YELLES CHAUCHE

Devant le jury :

Président : Abderrahmane BENSMAINE MCB Université de Tlemcen

Encadreurs : Latéfa GHOMRI MCA Université de Tlemcen

Zaki SARI Professeur Université de Tlemcen

Pierre CASTAGNA Professeur IUT de Nantes

Examineurs : Talib Hichem BETAOUAF MCB Université de Tlemcen

Abdelghani LARIBI Enseignant Université de Tlemcen

Fouad MALIKI MAA ESSA de Tlemcen

Année Universitaire : 2017/2018

Table des matières

Remerciements.....	6
Introduction générale.....	7
I. Chapitre 1 : De l'industrie 1.0 à l'industrie 4.0	10
1. Introduction	10
2. Histoire de l'industrie.....	10
2.1. Première révolution industrielle.....	10
2.2. Seconde révolution industrielle.....	11
2.3. Troisième révolution industrielle.....	11
2.4. Quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0)	12
3. Industrie 4.0.....	13
3.1. Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 :.....	14
4. Digital Twin	17
4.1. Pourquoi le Digital Twin ?.....	20
4.2. Les utilisations du Digital Twin.....	21
5. Conclusion :.....	22
II. Chapitre 2 : Outils de conception, de modélisation et d'implémentation d'un Digital Twin.....	24
1. Introduction	24
2. Présentation de la MPS500	24
2.1. Communication entre les stations	28
3. CIROS	30
4. Step7 / TIA PORTAL	31
5. EzOPC.....	32
5.1. Qu'est-ce qu'un OPC ?.....	32
6. KEPServerEX.....	34
7. Conclusion :.....	34
III. Chapitre 3 : Création d'un Digital Twin des stations commandées par des automates du MPS500.....	36
1. Introduction	36
2. Méthodes de programmation des stations sur CIROS	36
2.1. Méthode 1 : En utilisant l'API virtuel intégré sur CIROS.....	36

2.2. Méthode 2 : En utilisant un API externe virtuel ou réel	40
3. Réalisation du Digital Twin	43
3.1. Configuration API.....	44
3.2. Configuration OPC Server « KepServer ».....	48
3.3. Configuration du modèle CIROS.....	51
4. Développement de travaux pratiques :	54
5. Conclusion :.....	55
Conclusion et perspectives.....	56
Annexe : Travaux pratiques.....	62

Liste des Figures

Figure I-1 : Machine à vapeur lors de la première révolution industrielle.....	10
Figure I-2 : Chaîne de montage au cours de la seconde révolution industrielle[3].....	11
Figure I-3 : Apparition des bras robotiques et des automates[4]	12
Figure I-4 : Numérisation de l'industrie[5].....	12
Figure I-5 : Les piliers autour desquels L'industrie 4.0 est bâtie [13].....	15
Figure I-6 : BionicCobot de FESTO	15
Figure I-7 : Conceptual Ideal for PLM[18]	17
Figure I-8 : Digital Twin appliqué à un système de production [22].....	19
Figure I-9 : Le processus d'évolution de l'atelier de production [23].....	21
Figure II-1 : La station MPS 501 FMS	24
Figure II-2 : MPS 507 FMS	25
Figure II-3 : Entrée marchandises	25
Figure II-4 : Usinage	26
Figure II-5 : Assurance qualité.....	26
Figure II-6 : Assemblage.....	26
Figure II-7 : Magasin.....	27
Figure II-8 : Sortie des marchandises.....	27
Figure II-9 : Système de transport.....	27
Figure II-10 : le flux des matériaux dans la MPS 507 FMS.....	28
Figure II-11 : Exemple de couplage E/S de l'atelier "Entrée marchandise"	29
Figure II-12 : La communication 1 bit entre deux stations d'après l'exemple des stations de distribution et de contrôle.....	30
Figure II-13 : CIROS.....	30
Figure II-14 : Robot sur CIROS	31
Figure II-15 : Interface et tableau de bord de CIROS	31
Figure II-16 : Usine sur CIROS	31
Figure II-17 : Interface EzOPC	32
Figure II-18 : Centralisation de données grâce à OPC.....	33
Figure II-19 : Fonctionnement d'OPC.....	33
Figure III-1 : Module de transfert (gauche) ; Station de distribution (droite).....	36
Figure III-2 : Barre des menus sur CIROS.....	37
Figure III-3 : Rubrique HELP de CIROS.....	38
Figure III-4 : Table des mnémoniques de la station de distribution.....	38
Figure III-5 : Langage Ladder sur SIMATIC STEP7	39
Figure III-6 : Barre des menus sur CIROS.....	39
Figure III-7 : Fenêtre des contrôleurs sur CIROS (API Virtuel).....	40
Figure III-8 : Fenêtre de PLC Switch sur CIROS	41
Figure III-9 : Interface EzOPC.....	41
Figure III-10 : Configuration des adresses entrées /sorties	42
Figure III-11 : Interface EzOPC et PLCSIM lors de la simulation	42
Figure III-12 : Emulateur EasyPort.....	43
Figure III-13 : Principe de fonctionnement.....	43

Figure III-14 : Interface STEP7.....	44
Figure III-15 : barre d'outils (ajouter un nouvel objet)	45
Figure III-16 : configuration matériel (choix du support).....	45
Figure III-17 : configuration matériel (choix du CPU)	46
Figure III-18 : Configuration matériel (compilation).....	46
Figure III-19 : Mise en place d'un réseau ethernet	47
Figure III-20 : structure du réseau des APIs	48
Figure III-21 : Interface kepsserver	48
Figure III-22 : barre d'outils kepsserver	49
Figure III-23 : configuration matériel(choix du canal)	49
Figure III-24 : configuration matériel (choix de l'appareil).....	50
Figure III-25 : configuration matériel (adresse IP)	50
Figure III-26 : configuration matériel (chemin du fichier S7P)	51
Figure III-27 : Configuration E/S kepsserver	51
Figure III-28 :sélection du controlleur	52
Figure III-29 :Sélection du nom du serveur	53
Figure III-30 : OPC inputs/Outputs.....	53
Figure III-31 : Manual operation.....	54
Figure III-32 : Modèles de systèmes automatiques sur CIROS	54
Figure C-1 : Pièce virtuelle en avance	57
Figure C-2 : Pièce virtuelle en retard	57

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadrante madame GHOMRI Latéfa de l'université de Tlemcen pour tous les efforts qu'elle a fait ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordé durant tout le déroulement de ce projet.

Nous remercions ensuite nos co-encadrants : le professeur SARI Zaki de l'université de Tlemcen et le professeur CASTAGNA Pierre de l'IUT de Nantes qui n'ont pas hésité à mettre à notre disposition leurs grande expérience et compétence et qui nous ont continuellement guidé et soutenu pour que ce projet soit mené à bon port, nous ajoutons à cela le fait que nous avons été bien accueillis au sein du laboratoire des sciences du numériques de l'IUT de Nantes où une grande partie du stage s'est déroulée et dans lequel le professeur CASTAGNA a pris soin de mettre à notre disposition tout ce dont nous avons besoin.

Nous adressons nos sincères remerciements également à FESTO France et plus particulièrement à monsieur BONNE Didier qui a fait en sorte de nous accueillir chaleureusement au sein de l'équipe FESTO Didactique et qui nous a fait part de sa générosité, son attention et son expérience qui ont fait que le stage s'est déroulé dans de parfaites conditions en ayant à notre disposition un soutien tant matériel que moral. Un grand merci à monsieur Cedric Vandermeersch de nous avoir grandement aidé, conseillé et soutenu ainsi qu'à monsieur Flavio Del Cueto pour ses précieux conseils et pour son grand soutien.

Il nous est impossible d'oublier tous nos enseignants et enseignantes qui nous ont transmis tout leur savoir durant ces années, qui nous ont vu grandir et évoluer au fil du temps, nous leurs en sommes infiniment reconnaissants et nous leurs devons la réussite de ce projet.

Nous ne remercierons jamais assez nos parents qui nous ont le plus soutenu et encouragé durant toute notre vie, c'est grâce à eux que nous en sommes là aujourd'hui.

Finalement nous tenons à remercier nos ami(e)s qui n'ont pas hésité à nous faire part de leur soutien, plus particulièrement DIB Inès et HAMZAOUI Adel qui nous ont aidé à écrire et à améliorer ce document.

Introduction générale

L'âge industriel est aussi important que l'apparition de l'agriculture au Néolithique : il y apparaît en effet une idée de rupture avec le passé, il est caractérisé par une croissance durable et irréversible de la production industrielle, accompagnée de transformations dans l'organisation de la production et dans les sociétés. Dès la préhistoire, il y a eu l'apparition des premières activités humaines pouvant être qualifiées d'industrielles dont les plus anciens témoins sont des outils et armes en pierre, d'abord taillée, puis polie.

De nouvelles techniques apparaissent au Moyen Âge, et avec elles de nouvelles industrialisations. Le XIII^{ème} siècle voit par exemple, l'apparition de l'utilisation du charbon comme combustible. Les nombreuses guerres nécessitent une production importante dans certains domaines.

La première révolution industrielle commence aux alentours de 1790, pour se terminer aux prémices de la seconde révolution industrielle. Les inventions motrices de cette période sont liées à la vapeur et au charbon ; son centre d'activité principal est le Royaume-Uni, puis, quelques décennies plus tard, la révolution industrielle touche la Belgique, ultérieurement, le nord de la France, la Suisse, et enfin l'Allemagne.

La deuxième révolution industrielle commence aux alentours de 1850, et s'arrête aux environs de la fin de la Seconde Guerre mondiale. Les inventions principales de cette période ont un rapport direct avec l'exploitation des découvertes en électricité.

Après cela, on assiste à la troisième révolution industrielle, aussi appelée révolution technologique, Il s'agit d'inventions essentiellement européennes. De nouveaux modes de production apparaissent, ainsi que les automates programmables et les robots industriels qui ont automatisé certaines tâches effectuées par l'humain auparavant.

De nos jours, l'évolution rapide des technologies, la transformation des métiers et les nouvelles exigences des clients poussent l'entreprise à moduler son usine pour devenir plus innovante, compétitive et créatrice d'emplois, elle doit également veiller à produire de façon économe, accélérer la mise sur marché de ses produits et offrir plus de valeur ajoutée à ses clients, tout en s'appuyant sur des systèmes de production flexibles et réactifs.

C'est dans ce contexte complexe que nous assistons à l'arrivée de l'Industrie 4.0, l'entreprise manufacturière et les systèmes de production évoluent avec des contraintes où la qualité des produits, la réduction des délais de mise en marché et le degré d'innovation constituent l'essentiel de la compétitivité.

L'utilisation des nouvelles technologies, telles que les systèmes de production avancés, l'Internet des objets et la fabrication additive, constitue un levier majeur pour l'entreprise. Celle-ci a besoin d'adapter rapidement ses processus en fonction de la demande (personnaliser les produits) et de collaborer avec tous les acteurs de la chaîne de valeur.

Les nouvelles technologies représentent aujourd'hui un large éventail de logiciels et d'équipements qui, lorsque connectés, peuvent transformer l'entreprise manufacturière en une usine intelligente appelée « usine du future ».

Ce qui marque le plus cette révolution, c'est la volonté de l'homme à faire fusionner le monde réel et le monde virtuel. Ainsi, l'entreprise pourra évoluer parallèlement dans deux mondes qui communiquent entre eux via les différentes technologies de l'information et de communication, dès lors, il est maintenant possible de voir en temps réel sur une plateforme de simulation virtuelle le comportement d'une ou d'un groupe de machines et l'évolution des produits, comme il est également possible d'interagir sur cette plateforme pour affecter directement la réalité ; ce jumeau virtuel (Digital Twin) s'impose comme une nécessité dans un milieu devenu complexe car il offre des avantages et des perspectives diverses tels que l'aide à la décision, la prédiction etc.

C'est sur cette vision que nous avons mené ces travaux dans le but de créer un Digital Twin de la MPS500 de FESTO (chaîne de production didactique) en utilisant le logiciel de simulation CIROS de la même compagnie. Ce travail est le résultat d'une collaboration très fructueuse entre le laboratoire de productique de l'université de Tlemcen (MELT), le laboratoire des sciences du numériques (LS2N) de l'IUT de Nantes ainsi que FESTO France.

Sur la première partie de ce document, nous allons revenir sur l'histoire de l'industrie et des différentes révolutions industrielles et nous nous focaliserons plus particulièrement sur l'industrie 4.0 pour finalement clôturer sur le Digital Twin qui est l'un des principaux piliers de cette révolution.

La deuxième partie est quant à elle dédiée aux outils que nous avons à notre disposition et qui nous ont permis la réalisation de ce projet, ainsi nous offrons une documentation des différents matériels et logiciels utilisés.

Finalement, la dernière partie répondra à la question « comment ? » dans laquelle nous présentons sous forme de tutoriel détaillé les différentes démarches et manipulations que nous avons effectuées pour la réalisation du Digital Twin.

Chapitre 1

De l'industrie 1.0 à l'industrie 4.0

I. Chapitre 1 : De l'industrie 1.0 à l'industrie 4.0

1. Introduction

L'objet de ces travaux est la création d'un Digital Twin de la MPS500 qui est un système de production flexible de chez FESTO en utilisant le logiciel de simulation CIROS. Ce premier chapitre nous permettra dans un premier temps de découvrir brièvement les événements historiques majeurs par lesquels est passée l'industrie et qu'on nommera « **révolutions industrielles** ». Nous nous intéresserons par la suite à la quatrième révolution industrielle ou l'industrie 4.0, une révolution actuellement en cours et qui apporte son lot de changements et de technologies que nous décrivons dans la deuxième partie de ce chapitre. Finalement, nous parlerons du Digital Twin qui est considéré comme étant l'un des piliers de l'industrie 4.0 et de ses caractéristiques et utilités.

2. Histoire de l'industrie

2.1. Première révolution industrielle

La première révolution industrielle s'est déroulée au milieu et à la fin du 18^{ème} siècle. Le point de départ fut l'introduction d'installations de production mécanique utilisant l'eau et la vapeur comme le premier métier à vapeur en 1784. La mécanisation du travail a conduit à une première industrialisation de l'industrie textile et sidérurgique, ce qui a engendré, une séparation accrue de la propriété et du service (indissociables auparavant) à cause des nouvelles machines qui nécessitaient un investissement élevé en termes de coût d'achat et de production que l'artisan lambda de l'époque ne pouvait pas se permettre. Dans le même temps, les machines ont permis une main-d'œuvre considérablement améliorée, contre laquelle les artisans conventionnels et indépendants sans pareil équipement n'ont pu résister, ce qui les poussa à vendre leur indépendance et à devenir de simples opérateurs exécutant les directives organisationnels d'un propriétaire qui fixait lui-même les heures de travail, les prix, l'équipement, les méthodes...[1].

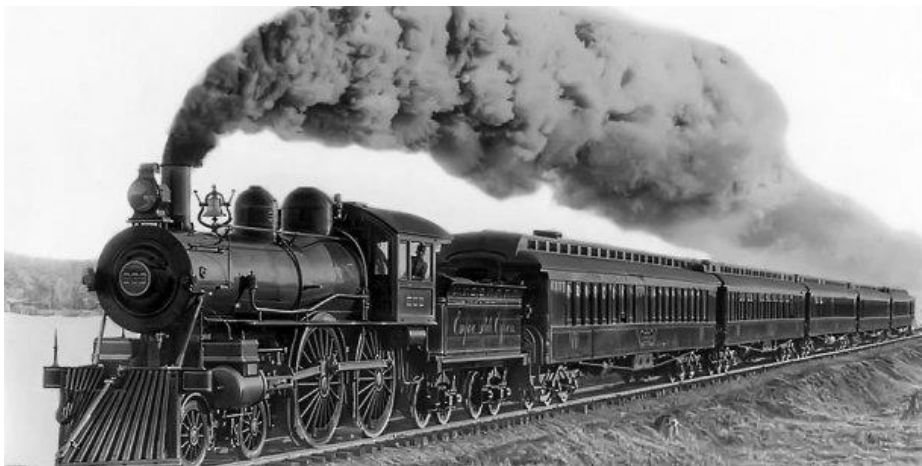


Figure I-1 : Machine à vapeur lors de la première révolution industrielle

2.2. Seconde révolution industrielle

Environ un siècle après la première révolution industrielle, l'introduction de la production de masse à forte intensité de main-d'œuvre à l'aide de l'énergie a marqué le début de la deuxième révolution industrielle à la fin du 19^{ème} siècle, qui est généralement associé aux premières lignes de production dans les abattoirs de Cincinnati vers 1870. Les possibilités offertes par les courroies de transport et les convoyeurs ainsi que l'énergie électrique ont fait progresser la mécanisation des installations de production et la production de masse. Les artisans étaient de plus en plus remplacés par des ouvriers semi-qualifiés dont le faible niveau de qualification était suffisant pour le travail en chaîne monotone, le marché du travail était quant à lui caractérisé par un excédent d'offre qui se traduisait par de bas salaires pour les travailleurs. Pour les entreprises, les nouvelles opportunités de production de masse repensaient le point de départ, les flux de travail et les structures organisationnelles et les optimisaient en termes de productivité[1].



Figure I-2 : Chaîne de montage au cours de la seconde révolution industrielle[3]

2.3. Troisième révolution industrielle

Alors que la première et deuxième révolution parlent d'une mécanisation croissante de la production, la troisième révolution industrielle, qui se situe au début des années soixante du 20^{ème} siècle, représente une nouvelle dimension dans l'automatisation de la production. Elle se caractérise par l'utilisation de l'électronique ainsi que des technologies de l'information et de la communication (TIC), qui permettent l'automatisation et la production en série plus variée. Le premier automate programmable (PLC) date de 1969 et connaît depuis un développement rapide. Un autre exemple de l'énorme potentiel des nouvelles technologies est l'introduction de la technologie d'impression 3D en 1983[1] qui a ouvert une nouvelle ère dans l'industrie, et va s'avérer être l'un des axes autour duquel sera battit la quatrième révolution industrielle, ou l'industrie 4.0.



Figure I-3 : Apparition des bras robotiques et des automates[4]

2.4. Quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0)

Les visions de l'Industrie 4.0 incluent la personnalisation des produits, la production flexible, l'optimisation de la chaîne de valeur en temps réel, les systèmes de gestion adaptative des effectifs, les systèmes d'apprentissage mobiles, l'interaction homme-machine multimodale et l'usine intelligente [1]. Ainsi, suivant la même logique, la nomination « Industrie X.0 » s'est généralisée pour les révolutions précédentes (Industrie 1.0 pour la première révolution industrielle, Industrie 2.0 pour la deuxième etc.)



Figure I-4 : Numérisation de l'industrie[5]

3. Industrie 4.0

Dans un monde où les développements scientifiques et technologiques évoluent de façon exponentielle, et avec l'ère de la mondialisation à laquelle nous assistons, le monde de l'industrie s'est vu contraint de revoir ses démarches et stratégies afin de s'adapter à ces changements pour satisfaire les demandes liées au client (qui devient de plus en plus exigeant), et à l'environnement. Ces facteurs ont poussé certains pays à revoir leurs stratégies en matière d'industrie, ce qui a donné naissance à différents projets pour améliorer et développer ce secteur. Parmi ces initiatives on retrouve l'« Industrie 4.0 » en Allemagne suivit de « Made in China 2025 » en Chine... avec un objectif commun : moderniser l'industrie en la rendant plus intelligente. Tout porte à croire que nous assistons là, à la quatrième révolution industrielle.

C'est en 2011, à la foire de Hanovre (Hannover Messe) en Allemagne que le terme « **industrie 4.0** » voit le jour, ce dernier fut l'intitulé d'un projet mis en place par le gouvernement fédéral d'Allemagne, et qui avait comme but de digitaliser et de renforcer la compétitivité de l'industrie allemande.

Germany Trade and Invest (GTAI) définit l'industrie 4.0 comme étant un changement de paradigme de la production « centralisée » à la production « décentralisée », rendu possible par les progrès technologiques qui constituent un renversement de la logique du processus de production classique. Autrement dit, cela signifie que les machines de production industrielles ne se contentent plus de « traiter » le produit, mais que le produit communique avec la machine pour lui dire exactement quoi faire « smart Product »[6].

Toujours selon le GTAI, l'industrie 4.0 représente « l'évolution technologique des systèmes embarqués aux systèmes de cyber-physique », une approche qui « relie technologies de production intégrées et les processus de production intelligents »[6].

De façon générale, l'industrie 4.0 qui est considérée comme étant la quatrième révolution industrielle va permettre l'interaction entre le monde réel et le monde virtuel en utilisant l'internet des objets, les systèmes cyber-physiques et bien d'autres technologies, pour donner naissance à ce qu'on appellera « la smart factory » ou l'usine intelligente[7].

Contrairement aux révolutions industrielles précédentes, l'industrie 4.0 est la seule révolution industrielle qu'on a pu prédire en amont, c'est-à-dire avant qu'elle ne se produise. Cette longueur d'avance sur le temps va permettre aux chercheurs et aux industriels de modéliser et de bâtir cette révolution suivant leurs besoins et leurs visions. Ceci dit, ces visions sont vues différemment entre les chercheurs et les industriels ou praticiens, ce qui fait qu'à ce jour il n'existe pas encore de définition claire de l'industrie 4.0, les définitions trouvées convergent mais ne se rejoignent pas forcément[7]. Ajoutant à cela que chaque pays, chaque acteur, insiste sur des priorités différentes concernant l'utilisation de cette nouvelle technologie[8].

Dans ce qui suit, quelques définitions de l'industrie 4.0 trouvées dans la littérature :

Définition 1 : « Industrie 4.0 est l'intégration de machines et de dispositifs physiques complexes avec des capteurs et des logiciels en réseau, utilisés pour prédire, contrôler et planifier de meilleurs résultats commerciaux et sociétaux »[7]

Définition 2 : « L'industrie 4.0 combine les méthodes de production avec les technologies de l'information et de la communication. Dans le monde de l'industrie 4.0, hommes, machines, équipements, systèmes logistiques et produits communiquent et interagissent entre eux directement »[9]

Définition 3 : « L'industrie 4.0 décrit l'Organisation des processus de production basés sur la technologie et les dispositifs communiquant de façon autonome les uns avec les autres le long de la chaîne de valeur » [10]

Le composant central d'Industrie 4.0 est le concept du système cyber-physique (CPS). Le terme système cyber-physique fait référence à la combinaison de systèmes logiciels et matériels dans un réseau complexe et intelligent dans lequel chaque objet physique a sa propre identité.

Un CPS se compose des approches technologiques de trois blocs de construction: l'informatique omniprésente, l'Internet des objets et des services et le Cloud Computing ainsi que d'autres technologies qui seront détaillées dans ce qui suit [1].

3.1. Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 :

L'industrie 4.0 a comme but d'intégrer les nouvelles technologies d'information, de robotisation, virtualisation... dont la croissance fut exponentielle durant ces dix dernières années, cela va conduire l'industrie telle que nous la connaissons aujourd'hui à subir une transformation de sa logique de fonctionnement. En effet, capteurs, machines, produits et système d'information vont être connectés tout au long de la chaîne de valeur rendant ainsi possible de rassembler et d'analyser les données de toutes les machines et de tous les systèmes, permettant donc des processus plus rapide, plus flexible et plus efficace et ce, pour produire des biens de meilleure qualité à des coûts réduits.

Rappelons ici que la quatrième révolution industrielle est un concept que chaque pays veut modéliser à sa manière suivant ses besoins. Néanmoins, une chose dont nous pouvons être sûrs et qui constitue l'essence même de cette révolution ; les différentes technologies qui sont entrain de rendre cette transformation possible (Figure I-5), et qui sont : le BIG DATA, les Robots autonomes, La simulation, l'intégration verticale et horizontale, l'internet des objets industriels (IIOT : Industrial Internet Of Things), la Cyber-sécurité, Le Cloud, la fabrication additive et la réalité augmentée.

- **Big Data** : Ce terme désigne des ensembles de données devenus si volumineux qu'ils dépassent les capacités humaines d'analyse et même celles des outils informatiques classiques. Cette « explosion des données » se produit dans de très nombreux domaines. Les systèmes de production n'échappent pas à ce phénomène [11], [12]. Dans l'industrie 4.0, la collecte et l'évaluation complète des données provenant de nombreuses sources différentes (Équipement et système de production, systèmes de gestion et clients) serviront à optimiser la production en participant à l'aide à la décision en temps réel [13].

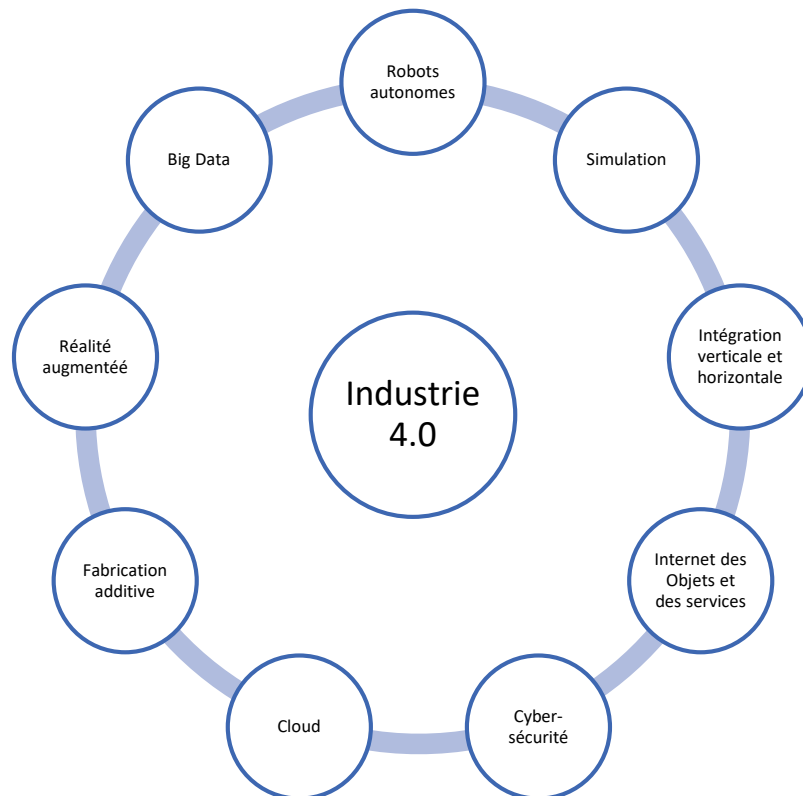


Figure I-5 : Les piliers autour desquels L'industrie 4.0 est bâtie [13]

- **Robots autonomes** : Actuellement les robots sont utilisés dans l'industrie pour effectuer des tâches complexes, ils sont généralement isolés par mesure de sécurité. Dans l'industrie 4.0 nous assistons à l'émergence de robots autonomes, flexible et coopératifs, leurs permettant ainsi de travailler côte à côte ou avec des humains en toute sécurité, ces robots sont appelés **Cobot**(Collaborative Robot)[13]. Exemple : le BionicCobot (Figure I-6) de FESTO qui est capable de travailler directement et en toute sécurité avec les humains[14].

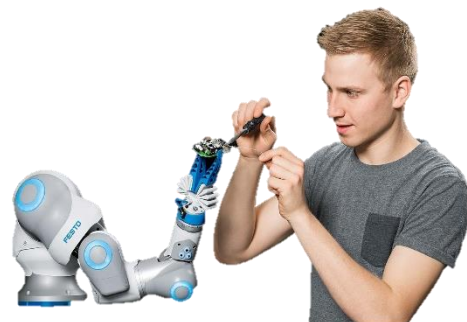


Figure I-6 : BionicCobot de FESTO

- **Simulation** : Les simulations dans l'industrie 4.0 représentent un axe important de telle sorte qu'elles s'appuieront sur des données en temps réel pour refléter le monde physique sous forme de modèle virtuel (Digital Twin, Systèmes cyber-physique), cela va permettre d'analyser le fonctionnement d'un système, de prévoir des événements tels que des pannes ou dysfonctionnements et ce, pour améliorer les performances et par conséquent augmenter la productivité [13].
- **Intégration verticale et horizontale** : Actuellement les systèmes informatiques ne sont pas entièrement intégrés, ce qui fait que les entreprises, les fournisseurs et les clients ne sont presque pas liés. Il en va de même pour les départements internes de l'entreprise. L'intégration verticale vise à optimiser la reconfiguration des processus de production en connectant l'ensemble des systèmes (capteurs, actionneurs...) avec les différents outils de gestion de production (planification, stocks...) ce qui va permettre un transfert d'information plus fluide et précis. Quant à l'intégration horizontale, elle vise à optimiser la chaîne de valeur du produit, en connectant l'entreprise avec les acteurs externes (fournisseurs, clients...) en utilisant des technologies telles que l'« Internet des services » [15].
- **Internet des objets industriels** : L'Internet des objets industriels, aussi appelé Internet industriel est un réseau d'une multitude d'appareils reliés par des technologies de communication qui aboutissent à des systèmes capables de surveiller, de collecter, d'échanger, d'analyser et de fournir de nouvelles informations précieuses comme jamais auparavant, ce qui permet de prendre des décisions plus intelligentes et plus rapides pour l'entreprise (Smart Manufacturing) [16].
- **Internet des services** : Permet aux fournisseurs de services d'offrir ces derniers via Internet. Ainsi les entreprises font en sorte de proposer des produits puis de transformer ces produits en services, l'exemple ci-dessous clarifiera mieux le concept.
 - Exemple : Le fabricant de voiture électrique TESLA vend des voitures électriques avec du matériel et du logiciel qui peut être amélioré via des mises à jours livrées via internet. Le client peut payer pour les mises à niveau qui génèrent alors un revenu supplémentaire pour TESLA.
- **Cyber-sécurité** : Les technologies que compose l'industrie 4.0 utilisent toutes des protocoles de communications standards, ce qui veut dire qu'ils sont d'une façon ou d'une autre connectés à un réseau, ce qui a engendré le besoin de protéger ces informations contre toute menace (Cyber-attaque...). Par conséquent, des communications sécurisées et fiables ainsi qu'une gestion sophistiquée des identités, des accès des machines et des utilisateurs sont essentielles[13].
- **Cloud** : Les entreprises utilisent déjà des logiciels basés sur le cloud pour certaines de leurs applications de gestion, mais avec l'Industrie 4.0, davantage d'entreprises liées à la production nécessiteront un partage accru des données à l'intérieur comme à l'extérieur de l'entreprise[13].

- **Fabrication additive** : Les entreprises commencent tout juste à adopter la fabrication additive, comme l'impression 3D (qu'elles utilisent principalement pour prototypes et produire des composants individuels). Avec l'Industrie 4.0, ces méthodes de fabrication additive seront largement utilisées pour produire de petits lots de produits personnalisés offrant des avantages de construction, tels que des conceptions complexes et légères. Des systèmes de fabrication additive haute performance et décentralisés réduiront les distances de transport et les stocks disponibles[13].
- **Réalité augmentée** : La réalité augmentée (RA) est définie comme une vue directe ou indirecte en temps réel d'un environnement physique réel dont les éléments sont augmentés par des données sensorielles générées par ordinateur, telles que des données sonores, graphiques ou GPS[17]. Par exemple, les travailleurs peuvent recevoir des instructions de réparation sur la façon de remplacer une pièce particulière lorsqu'ils examinent le système à réparer. Cette information peut être affichée directement dans le champ de vision des travailleurs en utilisant des dispositifs tels que des lunettes à réalité augmentée [13].

4. Digital Twin

Le terme Digital Twin (jumeau numérique) a été introduit la toute première fois en 2002 à l'université de Michigan par le docteur Michael Grieves dans sa présentation à l'industrie pour la création d'un centre de gestion du cycle de vie d'un produit PLM (Product Lifecycle Management)

L'une des diapositives de la présentation, comme le montre la Figure I-7, avait comme titre « Conceptual Ideal for PLM » ce qui deviendra par la suite « Digital Twin ». Ce concept reflète en effet une représentation dynamique d'un système composé de deux systèmes, l'un réel et l'autre virtuel et que ces deux derniers sont liés tout au long du cycle de vie du système[18].

Comme le montre la Figure I-7, ce concept est composé de trois parties : Le produit physique dans l'environnement réel, le produit virtuel dans un environnement virtuel et la connexion des données et de l'information qui relie les deux environnements[18].

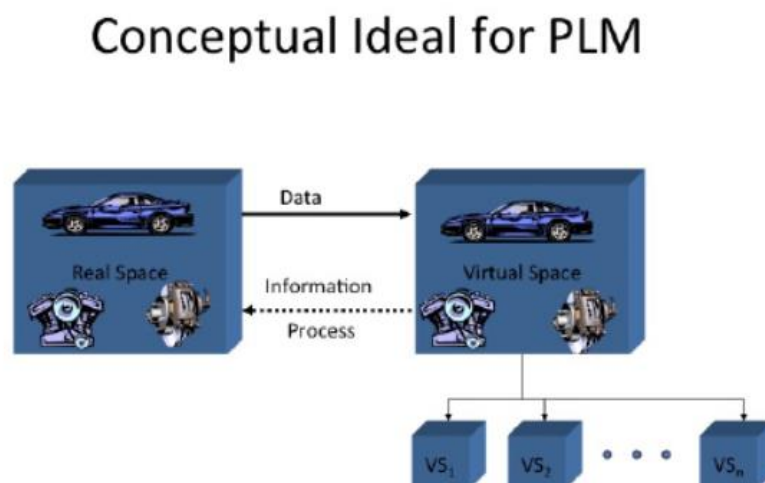


Figure I-7 : Conceptual Ideal for PLM[18]

Avant que ce concept ne se généralise, il a été utilisé dans un premier temps dans les domaines de l'aéronautique et l'aérospatial, notamment par la NASA qui est à l'origine du terme « Digital Twin » [19]. Ce dernier a ensuite été appliqué sur les avions de chasse et les véhicules de l'agence spatiale [18], pour ensuite s'étendre et évoluer jusqu'à atteindre le monde de l'industrie.

En effet, la NASA a pris soin de donner une définition générale au concept : « Un Digital Twin est une simulation multi-physique multi-échelle intégrée d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, les mises à jour de capteurs, l'historique de flotte, etc., pour refléter la vie de son jumeau volant correspondant »[19].

Dans l'industrie, il existe plusieurs définitions du jumeau numérique, et ce, selon le besoin et les orientations de chacun, celles qui vont suivre sont les plus intéressantes et les plus récentes, car les définitions ont changé au fur et à mesure que la technologie s'est développée :

« Représentation numérique dynamique d'un actif industriel ; qui permet aux entreprises de mieux comprendre et prédire les performances de leurs machines et de trouver de nouvelles sources de revenus et changer le mode de fonctionnement de leur entreprise » [20]

« C'est un modèle virtuel d'un processus, un produit ou un service. Cette appariement des mondes virtuels et physiques permet l'analyse des données et la surveillance des systèmes afin de parer aux problèmes avant même qu'ils surviennent, prévenir les interruptions de service, développent de nouvelles opportunités et même planifier pour l'avenir à l'aide de simulation. » [21]

« Un jumeau numérique peut être défini, fondamentalement, comme un profil numérique évolutif du comportement historique et actuel d'un objet physique ou d'un processus qui aide à optimiser les performances de l'entreprise. Le jumeau numérique est basé sur des mesures de données massives, cumulatives et en temps réel dans un ensemble de dimensions. Ces mesures peuvent être utilisées dans le développement d'un produit ou d'un processus sous la forme d'un produit ou d'un procédé. » [22]

De façon plus générale, et plus globale : *« le Digital Twin est un ensemble de constructions d'informations virtuelles qui décrit complètement un produit manufacturé physique... du niveau micro-atomique au niveau macro-géométrique. » [18]*

Le concept du Digital Twin consiste à analyser continuellement le flux de données récolté de la partie matérielle. En effet, des capteurs placés tout au long du processus vont acquérir les données relatives à l'évolution du produits, ces données vont ensuite être transmises en temps réel à une plateforme numérique qui, à son tour, effectue une analyse pratiquement en temps réel afin d'optimiser ce processus de manière transparente, et de façon continue. Ceci va permettre entre autres d'analyser les données, de contrôler le système et même de prédire une éventuelle défaillance permettant ainsi d'agir et de réparer de façon proactive[22].

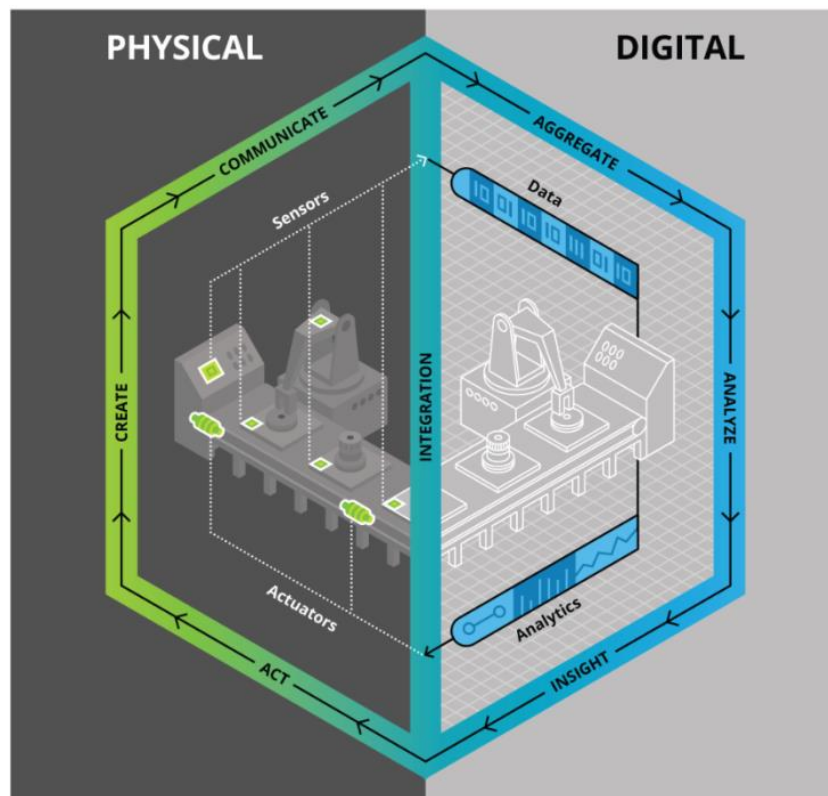
Le Digital Twin va aussi servir à faire fonctionner des machines et à planifier les ressources ce qui va augmenter l'efficacité opérationnelle et améliorer le développement des produits.

Remarque : Ne pas confondre le Digital Twin avec le Digital Shadow qui lui est uniquement l'ensemble des données de travail collectées à partir du monde réel [12].

La Figure I-8 met en évidence la rotation du flux des données entre, d'un côté, la partie réelle (PHYSICAL) qui se compose de capteurs et d'actionneurs, et de l'autre côté, la partie numérique ou virtuelle (DIGITAL) qui est constamment mise à jour.

Les éléments cités ci-dessus sont expliqués dans ce qui suit :

- **Capteurs :** Distribués tout au long de la chaîne, ils créent des signaux qui permettent au jumeau numérique de reproduire le comportement du réel dans les mêmes conditions.
- **Données :** les informations récoltées par les capteurs, mélangées avec les informations de l'entreprise telles que les nomenclatures, les systèmes de d'entreprise et les spécifications de conception. Ces données peuvent aussi contenir d'autres types d'informations qui dépendent du contexte dans lequel on se trouve.
- **Intégration :** les deux mondes (réel et virtuel) communiquent entre eux via des technologies d'intégration (tel que les ponts, les interfaces de communication et de sécurité).
- **Analytique :** Ce sont des techniques utilisées pour analyser les informations en utilisant des algorithmes, des simulations et des outils de visualisation qui vont aboutir à d'éventuelles idées.
- **Actionneurs :** Le Digital Twin envoie ces idées sous forme d'informations numériques (ou messages) aux actionneurs (opérateurs), qui vont effectuer l'action physique.



Source: Deloitte University Press.

Deloitte University Press | dupress.deloitte.com

Figure I-8 : Digital Twin appliqué à un système de production [22]

4.1. Pourquoi le Digital Twin ?

Rappelons que le but de l'industrie 4.0 et de toutes les technologies qui la compose (entre autre le Digital Twin), est de répondre à différents besoins. Ces derniers sont imposés par l'évolution technologique et un environnement externe de plus en plus rude (concurrence, clientèle exigeante, parties prenantes...)

Par conséquent, une maîtrise parfaite des chaînes de production est nécessaire, chose qui n'est pas évidente car ces dernières sont de plus en plus complexes et les maîtriser est une chose humainement impossible.

Avant de continuer, il faudra peut-être se poser la question sur le vrai sens du terme « maîtriser » : d'un point de vue technique « maîtriser un système » veut dire : connaître toutes les données relatives à ce dernier pour pouvoir agir sur lui sans pour autant affecter son comportement normal.

Le processus d'évolution de l'atelier de production (**Figure I-9**) reflète clairement la volonté des ingénieurs et des chercheurs à optimiser et à mieux comprendre les systèmes de production, et ce en ayant recours à la simulation et à la modélisation (Virtual Space) qui sont des outils devenus indispensables à la compréhension de n'importe quel système, qui dans ce cas-là, est un atelier de production noté « espace physique » (Physical Space).

Sur la Figure I-9, quatre étapes sont illustrées pour montrer le processus d'évolution de l'atelier de production [23].

Au tout début, faute de moyens d'information efficaces, la production dans l'atelier dépend entièrement de l'espace physique, ce qui conduit à une efficacité, une précision et une transparence faibles. Ensuite, avec le développement des technologies de l'information, les systèmes assistés par ordinateur commencent à être appliqués dans la production, mais comme les méthodes d'interaction sont faibles, l'espace virtuel est en décalage avec le physique.

Au troisième stade, bénéficiant des technologies de la communication (des capteurs, de l'IoT, etc.), il existe une interaction entre les deux espaces. À l'avenir, avec les développements continus des nouvelles technologies de l'information, l'espace virtuel jouera progressivement un rôle tout aussi important avec la connexion physique et la connexion bidirectionnelle qui sera également améliorée, ce qui favorise la poursuite de la convergence[23].

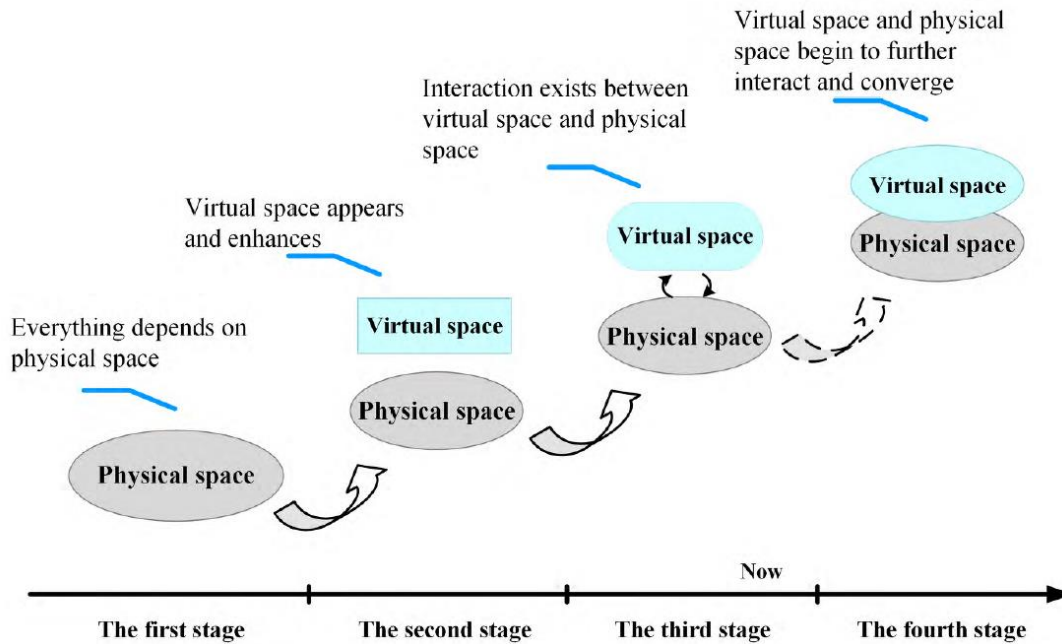


Figure I-9 : Le processus d'évolution de l'atelier de production [23]

On peut conclure qu'il est clair que le recours à l'espace virtuel de façon générale s'est imposé comme une nécessité face à la complexité croissante des systèmes de production, et que le Digital Twin en particulier est une destination inévitable dans l'industrie de demain.

4.2. Les utilisations du Digital Twin

Le Digital Twin s'avère être un outil puissant qui va permettre d'accompagner et d'aider les organisations, et plus particulièrement les ingénieurs. Cet outil va leur permettre d'apprendre plus, plus rapidement et briser les vieilles limites entourant l'innovation des produits, les cycles de vie complexes et la création de valeur[24], voici comment [25]:

- 1- **Visibilité** : Le Digital Twin permet une visibilité dans les opérations de machines ainsi que dans les grands systèmes interconnectés tel qu'une usine de fabrication ou un aéroport.
- 2- **Prédiction** : En utilisant les différentes techniques de modélisation, le jumeau numérique peut être utilisé pour prédire l'état futur d'un système.
- 3- **What if ?** : Grâce à des interfaces bien conçues, il est facile d'interagir avec le Digital Twin et de poser les questions de simulation au modèle pour simuler diverses conditions qui ne sont pas pratiques à créer dans la vraie vie.
- 4- **Outil de documentation et de communication** : Le modèle du Digital Twin peut être utilisé comme un mécanisme de communication et de documentation qui peut être à son tour utilisé pour comprendre et expliquer les comportements d'une machine ou d'un ensemble de machines.
- 5- **Outil d'aide à la décision** : Le Digital Twin peut aussi interagir et communiquer avec les différentes autres applications présentes dans l'organisation, telles que les applications de gestion (ERP...) pour atteindre les résultats opérationnels dans le contexte des opérations de la chaîne d'approvisionnement : fabrication, approvisionnement, entreposage, transport et logistique, service, etc.

5. Conclusion :

Ce chapitre avait comme but d'introduire le lecteur dans le monde de l'industrie et de ses évolutions au fil du temps en mettant l'accent sur la quatrième révolution industrielle ou l'industrie 4.0 qui constitue l'axe autour du quel ce projet se déroule.

Nous avons aussi défini dans ce chapitre la notion de « Digital Twin », ses origines, ses caractéristiques, ses utilités et son grand rôle dans l'industrie de demain. Néanmoins, cette notion reste très théorique et pas très avancée dans le monde industriel d'où le challenge que nous avons pris qui est de faire un Digital Twin de la MPS500 présente au niveau du laboratoire de productique (MELT) à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen en utilisant le logiciel CIROS et bien d'autres outils auxquels nous avons consacré le chapitre suivant pour les présenter en détail.

Chapitre 2

Outils de conception, de modélisation et d'implémentation d'un Digital Twin

II. Chapitre 2 : Outils de conception, de modélisation et d'implémentation d'un Digital Twin

1. Introduction

Ce chapitre constitue un pont entre l'aspect théorique du projet abordé dans le premier chapitre, et l'aspect pratique que nous verrons dans le troisième chapitre, de telle sorte que les différents outils qui rentrent dans la réalisation d'un Digital Twin seront abordés, ces outils peuvent être matériels tels que la MPS500 et ses différentes stations, ou logiciels tels que CIROS, SIMATIC Step7, OPC etc.

Nous nous sommes uniquement focalisés sur les caractéristiques et utilités qui nous ont paru pertinentes à connaître, car certains outils tels que CIROS offrent un large éventail d'utilisations qu'il aurait été inutile d'aborder dans ce document.

2. Présentation de la MPS500

Le système MPS-500 est une chaîne de production flexible, modulaire et polyvalente développé par FESTO, destiné aux formations technologiques. C'est en effet, la plate-forme idéale pour l'analyse, la compréhension et la maîtrise de l'interaction entre la mécanique, la pneumatique, l'ingénierie électrique, la technologie de contrôle et les interfaces de communication - toutes absolument essentielles pour une gestion correcte et réussie des systèmes industriels actuels.

Le MPS-500 est un système qui comprend des stations individuelles et peut être élargi successivement. La station du système de transport en représente l'élément central. Sur les installations MPS 500-FMS, chaque station présente au niveau du système de transport communique avec celui-ci. De cette façon le système de transport sait quelles sont les stations impliquées dans le processus de production et à quelle position de travail elles se trouvent. Si deux stations sont utilisées à une position de travail, comme par exemple les stations de distribution et de contrôle pour l'entrée de marchandises, un échange d'informations a alors lieu entre ces deux stations.

A cet effet, différentes dispositions des différentes stations sont possibles. Ceci dit, un certain ordre doit être respecté. Chaque disposition des stations est associée à une référence, par exemple celle de la figure ci-dessous est la MPS -501 FMS, qui se compose uniquement de deux stations et du convoyeur.

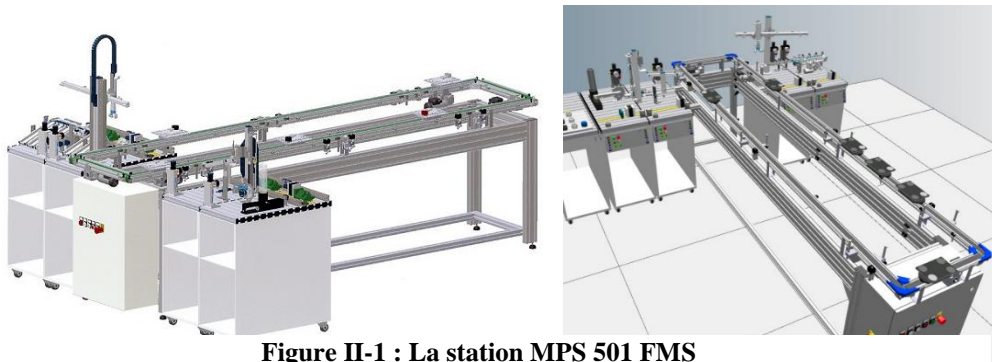


Figure II-1 : La station MPS 501 FMS

La configuration de la MPS500 dont dispose le laboratoire de productique (MELT) de l'université de Tlemcen, qui est celle sur laquelle nous allons travailler dans un premier temps pour la création du Digital Twin, est la MPS 507 FMS (voir **Figure II-2**), ce système est une usine comprenant six processus reliés par un système de transport qui se charge de transporter les pièces d'une station à une autre.

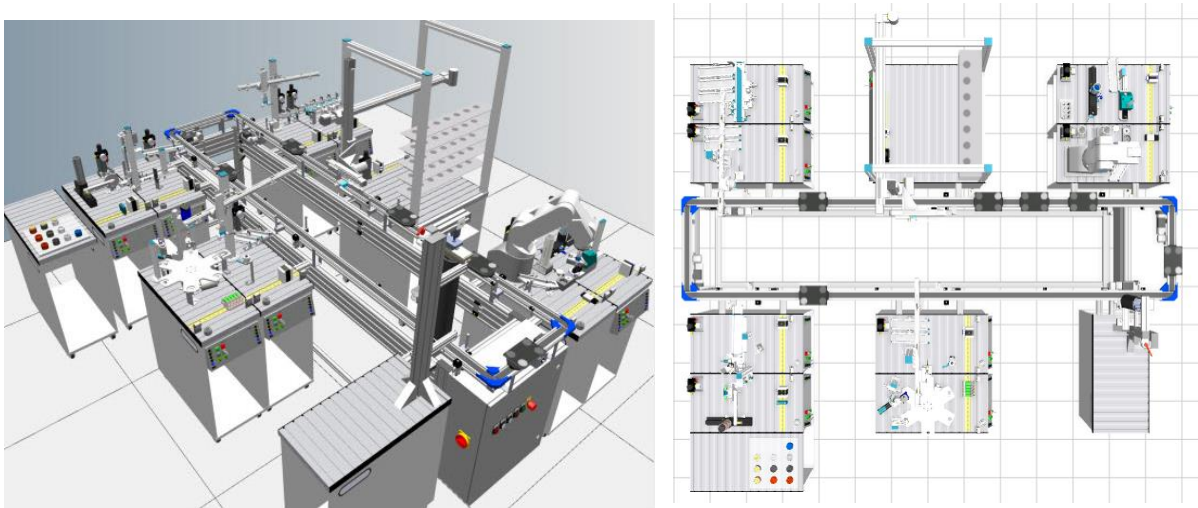


Figure II-2 : MPS 507 FMS

Dans ce qui suit, le fonctionnement des différents processus de la station MPS 507 FMS sera expliqué, ainsi que les stations qui la composent.

1. Entrée des marchandises :

Ce processus est composé de deux stations (station de distribution, station de contrôle) collées l'une à l'autre et communiquant via un capteur optique se trouvant à leurs extrémités (**Figure II-3**). Sur la station de distribution, les pièces à usiner sont séparées et transmises à la station de contrôle qui est accouplée au système de transport. La station de contrôle assure outre le contrôle des pièces à usiner, le transfert des pièces à usiner au système de transport. Le flux des matériaux commence à cette position de travail.

Ce processus sera étudié en détail plus loin dans le document.

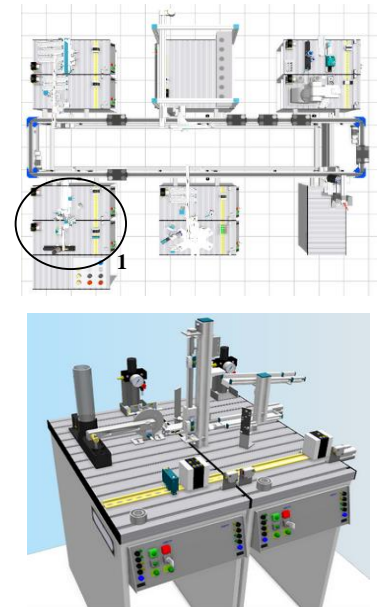


Figure II-3 : Entrée

2. Usinage :

Tout comme la station précédente, l'atelier d'usinage est composé de deux stations (Station d'usinage, station de manipulation). La station de manipulation se trouvant à l'extrémité du convoyeur, permet d'assurer le transport des matériaux de la palette (convoyeur) vers la station d'usinage. Celle-ci se trouve directement à côté de la station de manipulation et est responsable du perçage d'un trou puis du contrôle du perçage.

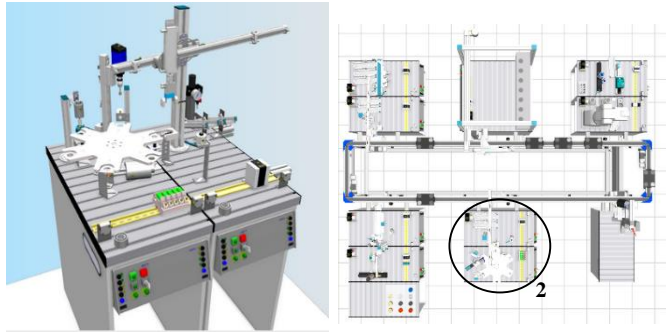


Figure II-4 : Usinage

3. Assurance qualité :

Un système vidéo est installé à la position de travail 3, la caméra est montée directement sur le système de transport et se trouve au-dessus de la position de travail. De cette manière, aucun déplacement de la pièce à usiner n'est nécessaire. Le système d'évaluation de la caméra est posé sur un chariot MPS ou un plan de travail.

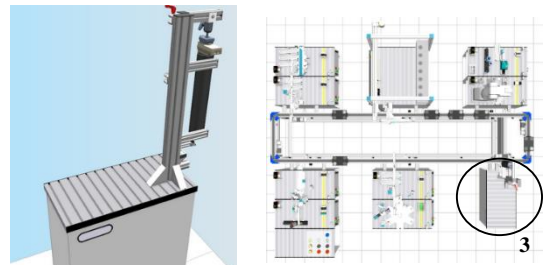


Figure II-5 : Assurance qualité

4. Assemblage :

La station d'assemblage robotisée se trouve à la position de travail 4. Elle se compose de deux chariots MPS. Le robot RV-2AJ est monté sur le chariot se trouvant directement à côté du système de transport. Il assure la manipulation des pièces à usiner et des composants d'assemblage. Quant au deuxième chariot MPS il fait office de stock pour les pièces nécessaires à l'assemblage.

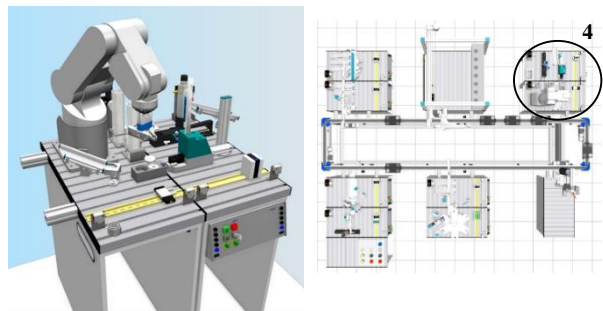


Figure II-6 : Assemblage

5. Magasin :

La station de magasin central automatisé est à disposition à la position de travail 5 pour le stockage des matériaux. Les pièces à usiner peuvent y être stockées et déstockées. La station du magasin central automatisé est un magasin de production et peut être utilisé dans un processus complet comme magasin d'entrée, intermédiaire ou de sortie. Le magasin central automatisé sert de plaque tournante logistique pour toutes les pièces finies ou les produits semi-finis. Utilisé comme magasin à rayonnage pour pièces, les points de réception (intégrés pour pièces de 40 mm de diamètre) peuvent stocker et déstocker jusqu'à 35 pièces à usiner dans les 5 allées du rayon. Le stockage et le déstockage a lieu du même côté frontal du magasin. Le magasin central automatisé permet l'application de différents principes pour la gestion des stocks : FIFO (First In First Out) ou LIFO (Last In First Out).

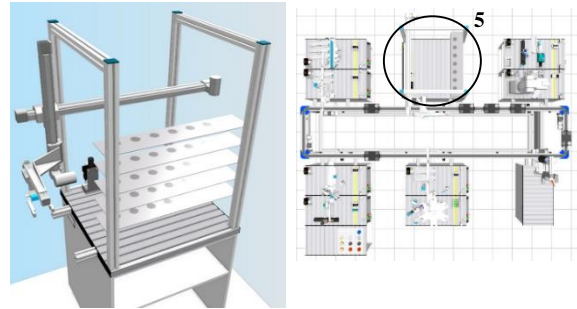


Figure II-7 : Magasin

6. Sortie des marchandises :

Cet atelier est le dernier de la ligne, il se trouve à la dernière position de travail et se compose lui aussi de deux stations (Station de manipulation et la station de tri). La station de manipulation, située directement à côté du système de transport permet grâce à son manipulateur flexible à deux axes d'acheminer la pièce du convoyeur vers la station de tri. Celui-ci s'occupe de trier les pièces selon leurs couleurs.

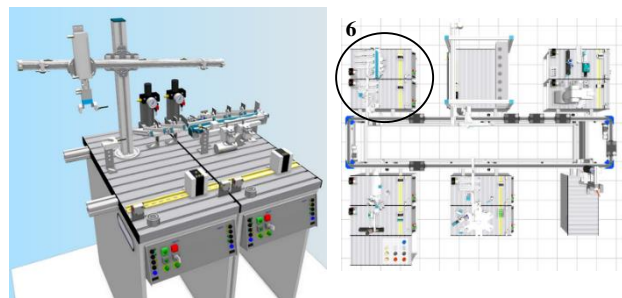


Figure II-8 : Sortie des marchandises

7. Système de transport :

La station du système de transport (**Figure II-9**) sert au transport des pièces au sein d'un système composé de différentes stations. Afin que la pièce soit transportée sans problème sur de grandes distances entre les stations, un système de transport est employé.

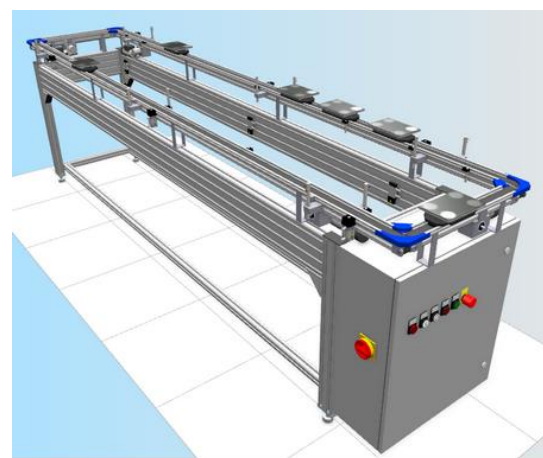


Figure II-9 : Système de transport

Dans l'usine MPS 507 FMS, les pièces suivent un routage précis (décrit dans la **Figure II-10**).

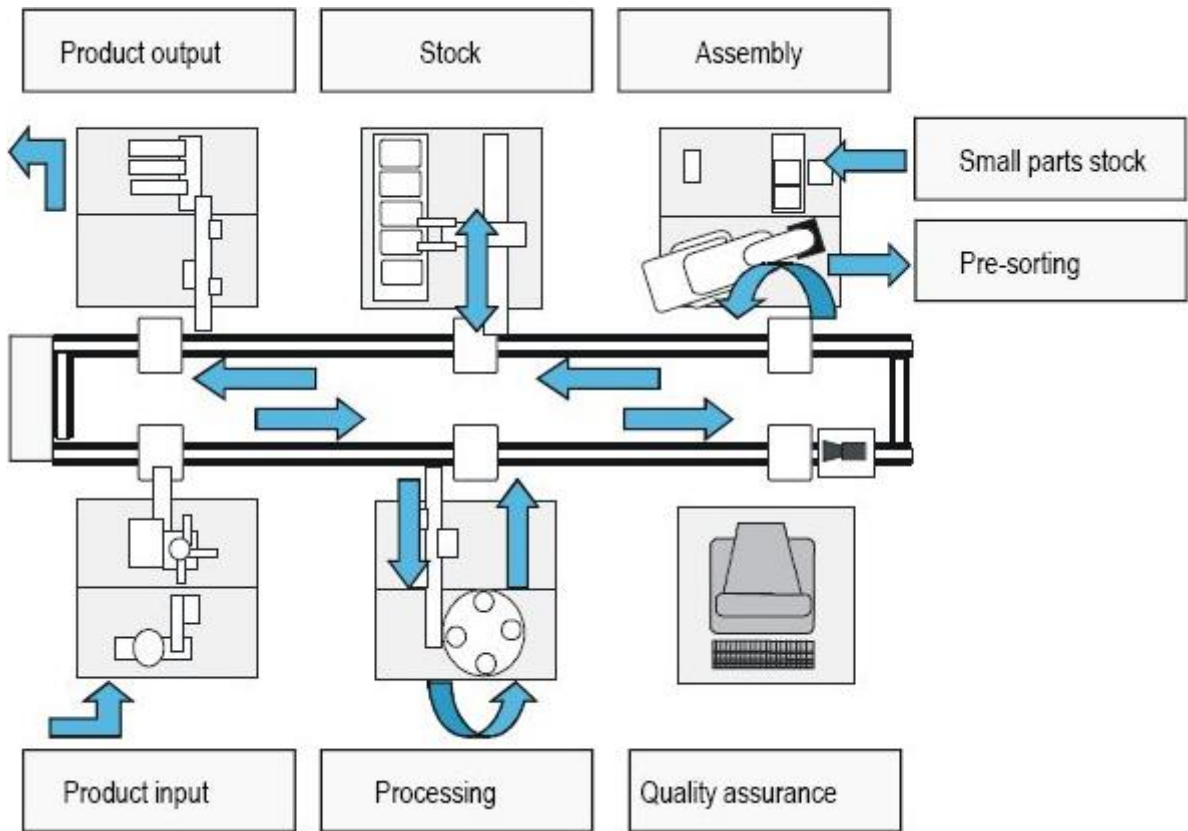


Figure II-10 : le flux des matériaux dans la MPS 507 FMS

Commençant par l'entrée des marchandises (Product input) et terminant par le stock ou la sortie des marchandises (Product output) selon les circonstances. En effet, les différentes stations présentent au niveau du système de transport communiquent avec celui-ci. De cette façon, le système de transport sait quelles sont les stations impliquées dans le processus de production et à quelle position de travail elles se trouvent.

2.1. Communication entre les stations

Afin que le processus de production puisse se dérouler correctement, les « unités intelligentes » de l'installation doivent échanger des informations et communiquer entre elles. Dans les installations MPS, il s'agit des différentes stations. Comment et avec qui les stations communiquent-elles ? cela dépend de leurs positions.

Dans l'installation MPS standard, une station communique normalement avec la station en amont et la station en aval. Si deux stations sont utilisées à une position de travail, comme par exemple les stations de distribution et de contrôle pour l'entrée des marchandises, un échange d'informations a alors lieu entre ces deux stations. Toutes les stations de l'installation communiquent par le couplage d'entrées et de sorties d'API. Ce type de communication est appelé couplage des E/S (**Figure II-11**).

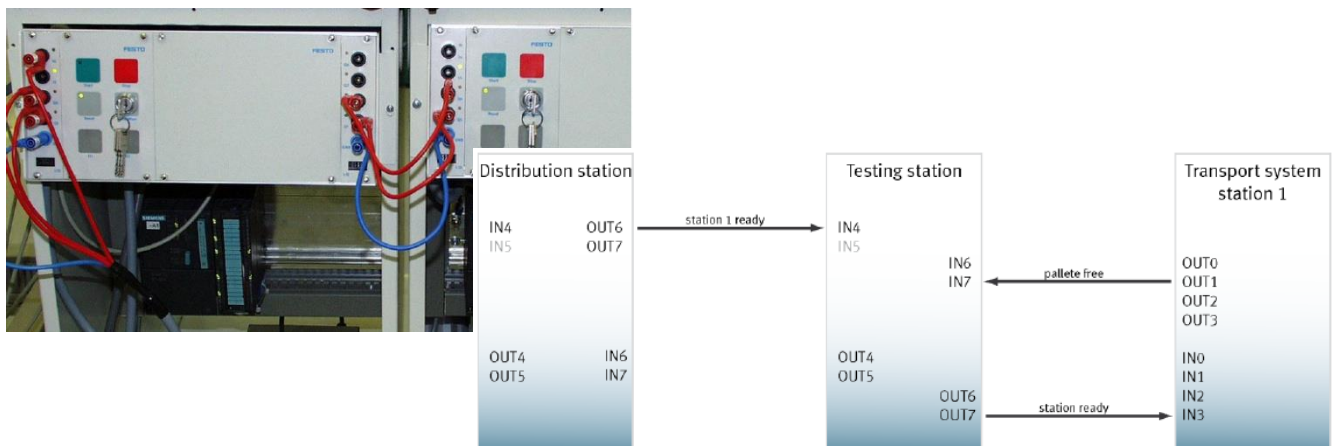


Figure II-11 : Exemple de couplage E/S de l'atelier "Entrée marchandise"

Remarques :

- Sur CIROS ce couplage est configuré automatiquement et n'est pas visible dans la simulation.
- Les autres couplages des autres stations sont disponibles sur la documentation de CIROS.
- On peut considérer ce couplage comme étant un moyen d'échanger des informations en background.

Un autre moyen de communication est présent, il est plus apparent et plus évident que le couplage E/S. Ce type de couplage est appelé StationLink.

StationLink utilise des barrières opto-électroniques unilatérales comme émetteurs et récepteurs. L'émetteur de StationLink est monté du côté entrée des marchandises de la station, le récepteur de StationLink du côté de la sortie de marchandises. Par l'activation ou la désactivation de l'émetteur de StationLink, la station signale à la station en amont si elle est prête à recevoir une pièce à usiner ou si elle est occupée. La communication permet ainsi d'assurer un transfert sûr entre les stations. Les capteurs servant à la concaténation de plusieurs stations doivent se trouver les uns en face des autres et coïncider. A cet effet, les stations disposent donc de points d'amarrage (**Figure II-12**).

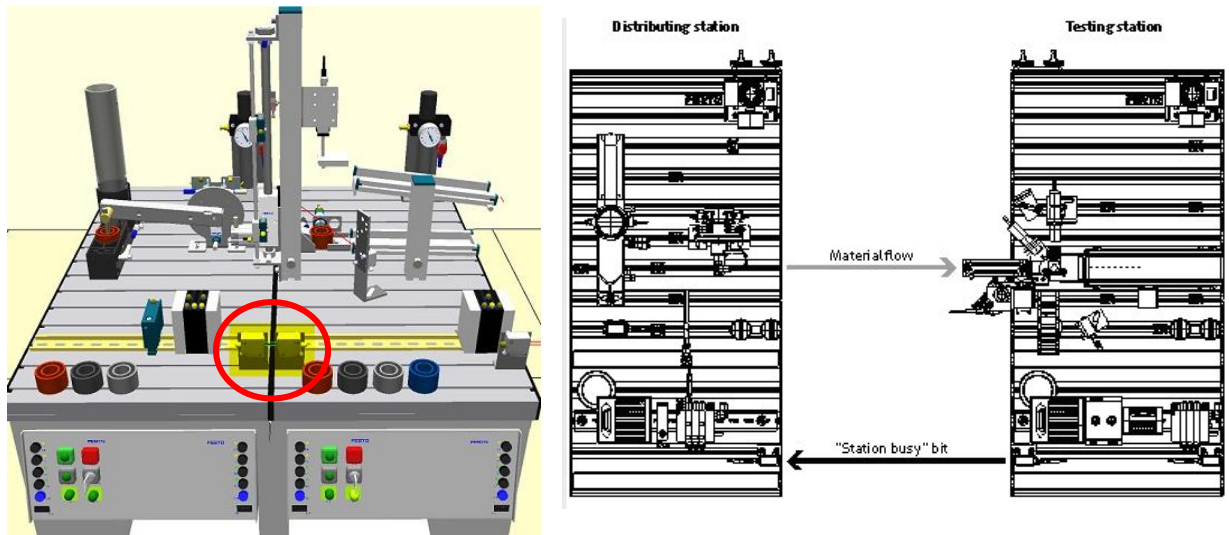


Figure II-12 : La communication 1 bit entre deux stations d'après l'exemple des stations de distribution et de contrôle

- Un bit est transmis de la station de contrôle à la station de distribution. Le bit indique si la station de contrôle est prête à recevoir une pièce à usiner ou si elle est occupée. Le flux de données a lieu dans un sens seulement, de la station de contrôle vers la station de distribution.
- Le flux de matériaux s'effectue dans le sens opposé, soit, de la station de distribution à la station de contrôle.

3. CIROS

CIROS est un logiciel de simulation 3D fournissant des modèles préconfigurés, ces modèles représentent des processus automatisés de production à différents niveaux de complexité.

CIROS permet à l'utilisateur de mieux maîtriser les technologies d'automatiques sans aucun risque pour l'humain ni pour le matériel en mettant à sa disposition plusieurs bibliothèques qui contiennent presque toutes les stations commercialisées par FESTO Didactic, cela permet de se familiariser avec l'environnement et les machines de ce dernier sans pour autant craindre un impact négatif sur le matériel réel.



Figure II-13 : CIROS

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

- **La programmation des robots :**

CIROS met à disposition de l'utilisateur plusieurs robots de différentes marques (MITUBISHI, KUKA, ABB...) Avec des cours, formations et vidéos permettant d'apprendre la manipulation et la programmation des robots d'une façon simple et efficace.



Figure II-14 : Robot sur CIROS

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

CIROS offre un environnement de travail idéal pour l'apprentissage et la programmation des API (majoritairement SIEMENS S7), en mettant à la disposition de l'utilisateur une interface facile et intuitive par laquelle beaucoup de données sont mises en évidence pour que l'utilisateur puisse avoir le maximum de feedback concernant l'état du système sur lequel il travaille. S'ajoute à cela le fait que CIROS soit compatible avec différentes autres plateformes qui permettent l'exécution des programmes directement en utilisant des outils tels que OPC (pour connecter avec STEP7 ou TIA PORTAL par exemple) ou le câble EasyPort (pour connecter le système virtuel de CIROS directement à un automate réel).

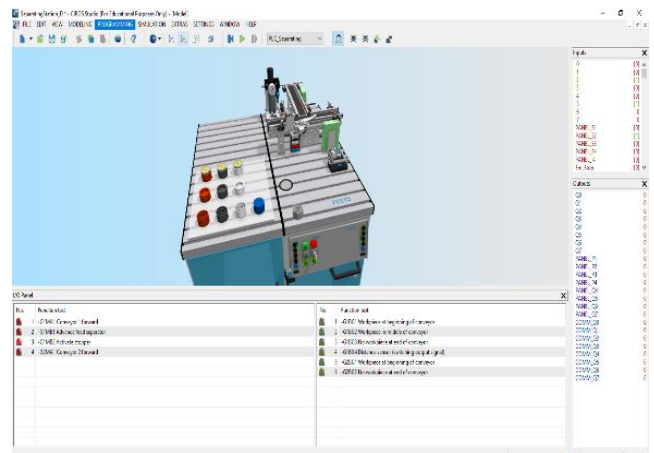


Figure II-15 : Interface et tableau de bord de CIROS

- **La planification et le contrôle de la production :**

CIROS permet de relier la simulation avec un contrôleur d'ordre supérieur des systèmes réels en mettant l'accent sur la planification des usines de production, la logistique interne et la conception, l'optimisation de MES (Manufacturing Execution Systems) ainsi que la gestion de la production.

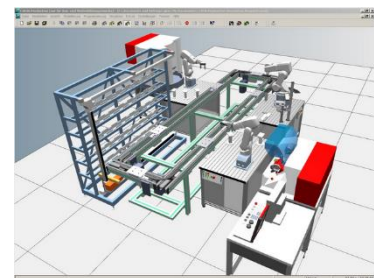


Figure II-16 : Usine sur CIROS

La seule différence entre ces deux versions, est que CIROS Education ne permet pas de créer de nouveaux modèles ou de connecter des systèmes de contrôle de robot.

4. Step7 / TIA PORTAL

SIMATIC Manager Step7 et TIA PORTAL sont des logiciels de programmation d'automates programmables développés par SIEMENS pour les automates SIEMENS. Les logiciels font en sorte qu'une machine donnée fonctionne automatiquement suivant une logique ou un programme préalablement développé et injecté sur l'automate. De plus, ces logiciels permettent

la configuration des appareils et du réseau pour tous les composants d'automatisation ainsi que leur diagnostic en temps réel.

Le logiciel TIA PORTAL intègre la partie qui permet de programmer des afficheurs industriels tels que les IHM (Interface Homme Machine).

5. EzOPC

EzOPC est un OPC serveur développé par FESTO qui assure la liaison de données entre deux périphériques, comme le montre la figure ci-dessous. Exemple : S7-PLCSIM CONTROLER vers CIROS

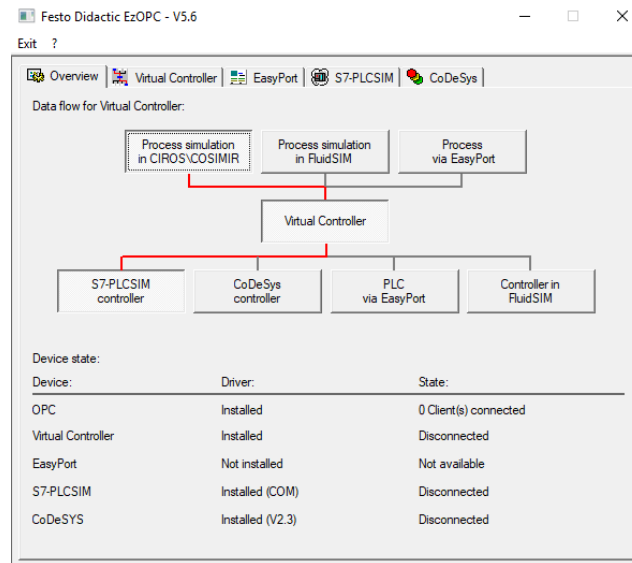


Figure II-17 : Interface EzOPC

5.1. Qu'est-ce qu'un OPC ?

« OPC est l'interopérabilité standard pour l'échange sécurisé et fiable de données dans l'espace de l'automatisation industrielle et dans d'autres industries. Il est indépendant de la plateforme et garantit la circulation continue d'informations entre les périphériques provenant de plusieurs fournisseurs. L'OPC Foundation est responsable de l'élaboration et du maintien de cette norme. Le standard OPC est une série de spécifications développées par des fournisseurs de l'industrie, des utilisateurs finaux et des développeurs de logiciels. Ces spécifications définissent l'interface entre les Clients et les serveurs, ainsi qu'entre les serveurs et les serveurs, y compris l'accès aux données en temps réel, suivi des alarmes et des événements, l'accès aux données historiques et d'autres applications. »[26]

6. KEPServerEX

KEPServerEX est une plate-forme de connectivité qui fournit une source unique de données d'automatisation industrielle à diverses applications. La conception de la plate-forme permet aux utilisateurs de connecter, gérer, surveiller et contrôler divers appareils d'automatisation et applications logicielles via une interface utilisateur intuitive. KEPServerEX exploite les protocoles de communication OPC (norme d'interopérabilité de l'industrie de l'automatisation) et IT (tels que SNMP, ODBC et services Web) pour fournir aux utilisateurs une source unique de données industrielles [27].

7. Conclusion :

L'intégralité de ce chapitre a permis de connaître les différents outils utilisés dont la plupart nous étaient étrangers au début de ce projet, ce qui fait que ce chapitre représente l'essence même de ces travaux car il va nous permettre de mieux comprendre ce qui va suivre dans le troisième et dernier chapitre dans lequel nous allons mettre en pratique ces outils pour créer un Digital Twin.

Chapitre 3

Création d'un Digital Twin des stations
commandées par des automates du MPS500

III. Chapitre 3 : Création d'un Digital Twin des stations commandées par des automates du MPS500

1. Introduction

Nous y sommes ! Dans ce chapitre, qui est sous forme de tutoriel, nous allons voir les étapes de création du Digital Twin. Mais avant, nous avons jugé préférable de décrire les démarches que nous avons suivies pour apprendre à maîtriser les logiciels, notamment CIROS et Step7 en commençant par les manipulations les plus basiques puis en montant graduellement en complexité et ce, afin que la logique de fonctionnement soit claire et nette aux yeux du lecteur. Ainsi, nous nous focaliserons dans ce chapitre sur la programmation des automates et la simulation, puis nous introduirons au fur et à mesure d'autres interfaces tel qu'OPC, pour que finalement, la partie « création de Digital Twin » soit abordée.

2. Méthodes de programmation des stations sur CIROS

On peut coder une logique propre à nous pour contrôler une ou plusieurs stations sur CIROS en utilisant TIA PORTAL ou SIMATIC Step7. Pour cela, plusieurs méthodes s'offrent à nous, dont deux se sont avérées être efficaces pour apprendre à maîtriser CIROS ainsi que le fonctionnement des stations et leurs programmations pour mener à bien la réalisation de notre projet.

2.1. Méthode 1 : En utilisant l'API virtuel intégré sur CIROS

La première méthode est idéale pour commencer à programmer et à se familiariser avec l'interface de CIROS en manipulant dans un premier temps les modules MPS (Exemple : Module MPS de transfert) qui sont des installations assez basiques contenant quelques capteurs (Boutons, capteurs fin de course...) et actionneurs (Vérins, moteurs...), puis de monter en complexité avec les stations MPS (Exemple : **Figure III-1**).

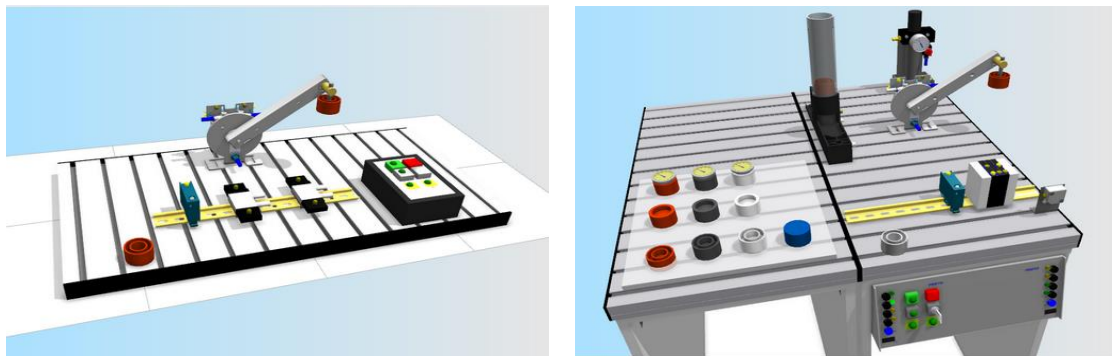


Figure III-1 : Module de transfert (gauche) ; Station de distribution (droite)

Cette méthode consiste à écrire le programme sur SIMATIC Step7 selon les affectations des entrées et sorties de la station fournie sur CIROS, l'enregistrer, fermer SIMATIC STEP7 pour ouvrir le fichier sur CIROS. Nous allons dans ce qui suit, expliquer en détail les différentes étapes de cette méthode en l'appliquant directement sur la station de distribution (**Figure III-1**).

Application :

Pour cette application, nous utilisons le logiciel SIMATIC STEP7.

Etape 1 :

Avant même de lancer STEP7 et de commencer à programmer, il est impératif de bien connaître le fonctionnement de la station et l'ensemble de ses composants (capteurs, actionneurs). Pour cela, la documentation de CIROS s'avère être un support très complet en ce qui concerne l'ensemble des stations MPS.

Pour accéder au modèle et à la documentation de la station de distribution :

- 1) Lancer CIROS Studio
- 2) Cliquer sur « HELP » puis « Content » (**Figure III-2**), Une nouvelle page s'ouvrira (**Figure III-3**)

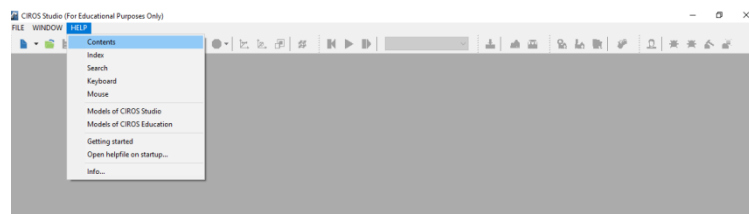


Figure III-2 : Barre des menus sur CIROS

- 3) Ouvrir le dossier « CIROS Education » puis « programmation API » et finalement « Station MPS »
- 4) Parmi les différentes station MPS cliquer sur « station de distribution »
- 5) Pour ouvrir le modèle sur CIROS Appuyer sur « ouvrir le modèle utilisateur »

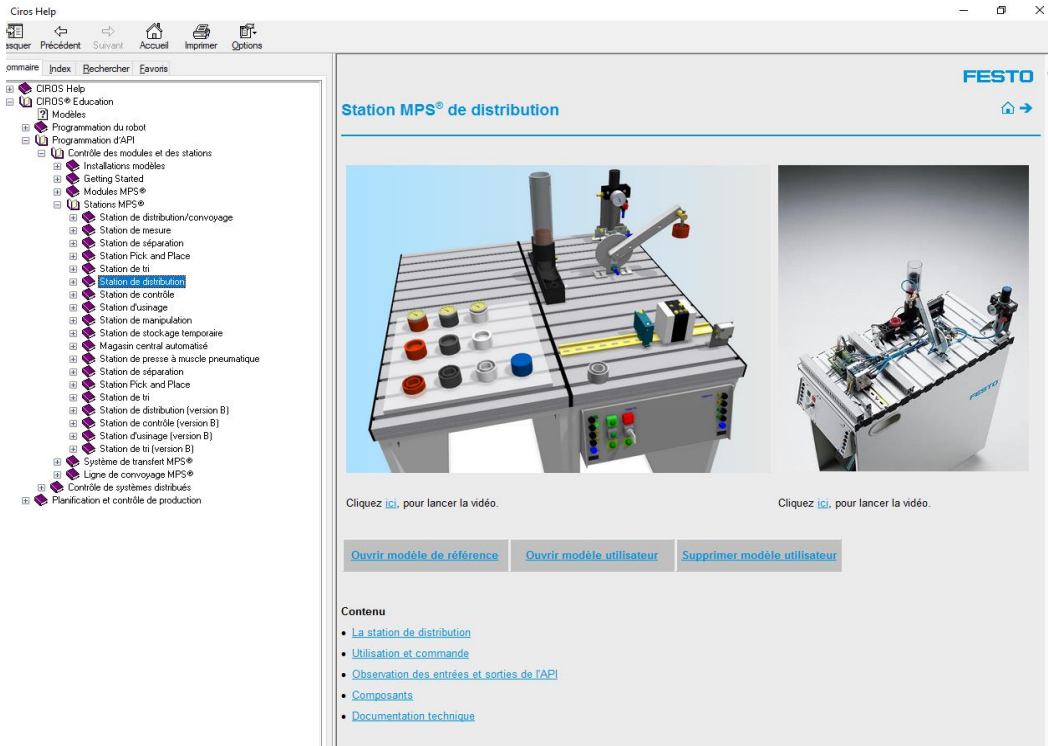


Figure III-3 : Rubrique HELP de CIROS

Étape 2 :

- 1) Ecrire le programme sur STEP7, pour cela il faudra dans un premier temps introduire l'ensemble des entrées/sorties de la station comme indiqué sur la documentation de CIROS (Voir la figure ci-dessous).

SIMATIC MPSC V22\01VE_AS\Symbole 21.01.2008 11:41:57

Symboltabellen-Eigenschaften	
Name:	Symbole
Kommentar:	
Erstellt am:	04.04.2006 13:51:22
Zuletzt geändert am:	22.05.2005 18:57:22
Letztes Filterkriterium:	Alle Symbole
Anzahl der Symbole:	20/20
Letzte Sortierung:	Adresse aufsteigend

Status	Symbol	Adresse	Datentyp	Kommentar
	1M1	A 0.0	BOOL	Auschiebzyl. Werkstück ausschieben/ Ejecting cylinder push out workpiece
	2M1	A 0.1	BOOL	Vakuum ein / Vacuum on
	2M2	A 0.2	BOOL	Abwurfimpuls ein / Ejection impulse on
	3M1	A 0.3	BOOL	Schwenkzyl. zu Magazin / Swivel drive to magazine
	3M2	A 0.4	BOOL	Schwenkzyl. zu Folgestation / Swivel drive to downstream station
	P1	A 1.0	BOOL	Leuchtmelder Start / Start indicator light
	P2	A 1.1	BOOL	Leuchtmelder Grundstellung (Reset) / Reset indicator light
	F5	A 1.2	BOOL	Leuchtmelder Magazin leer / Magazine empty indicator light
	1B2	E 0.1	BOOL	Auschiebzyl. ausgefahren / Ejecting cylinder extended
	1B1	E 0.2	BOOL	Auschiebzyl. eingefahren / Ejecting cylinder retracted
	2B1	E 0.3	BOOL	Werkstück angesaugt / Workpiece picked up
	3B1	E 0.4	BOOL	Schwenkzyl. in Pos. Magazin / Swivel drive in pos. magazine
	3B2	E 0.5	BOOL	Schwenkzyl. in Pos. Folgestation / Swivel drive in pos. downstream station
	B4	E 0.6	BOOL	Magazin leer / Sensor magazine empty
	IP_FI	E 0.7	BOOL	Folgestation frei / Downstream station free
	S1	E 1.0	BOOL	Taster Start / Start button
	S2	E 1.1	BOOL	Taster Stop (Offner) / Stop button (normally closed)
	S3	E 1.2	BOOL	Schalter Automatik-Manuell / Automatic-manual switch
	S4	E 1.3	BOOL	Taster Richten / Reset button
	Em_Stop	E 1.5	BOOL	NOT-AUS entriegelt / Emergency stop unlocked

Figure III-4 : Table des mnémoniques de la station de distribution

- 2) Sauvegarder le programme dans un fichier.

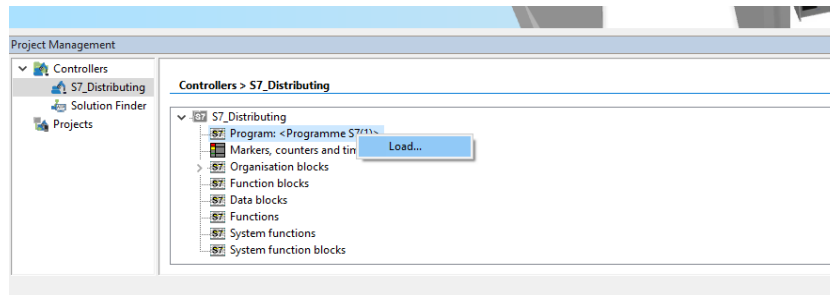


Figure III-7 : Fenêtre des contrôleurs sur CIROS (API Virtuel)

4) Lancer la simulation, et visualiser le fonctionnement.

Remarques :

- Cette méthode ne fonctionne qu'avec les programmes sous le format S7P, et donc on ne peut pas programmer avec TIA PORTAL, seule SIMATIC Step7 sauvegarde ses fichiers sous ce format.
- Cette méthode reste un bon moyen pour apprendre et se familiariser avec la programmation des APIs et avec l'environnement CIROS.

2.2. Méthode 2 : En utilisant un API externe virtuel ou réel

La deuxième méthode quant à elle s'avère être plus flexible car la station de distribution sur CIROS peut être commandée par différents types de contrôleurs qu'ils soient virtuels (PLCSIM, CoDeSys Controller ...) ou réels (API). Par conséquent, avec cette méthode on peut avoir le choix sur le logiciel de programmation (TIA ou SIMATIC Step7).

Pour ce faire, nous introduisons EzOPC qui se charge de récolter les données de l'API (Virtual ou réel) et de les transmettre en temps réel à la simulation sur CIROS qui est dans ce cas la station de distribution, les étapes de cette méthode sont citées dans ce qui suit.

Application :

Pour cette application, nous utilisons le logiciel TIA PORTAL V14 et PLCSIM V5.4 comme simulateur d'automate.

La première et deuxième étape sont similaires à celles de la première méthode, nous passons donc directement à l'étape 3.

Etape 3 :

A ce niveau-là, le programme peut être écrit soit avec TIA PORTAL ou bien avec SIMATIC Step7. La station de distribution devrait être ouverte sur CIROS, il ne reste plus qu'à faire la liaison via EzOPC.

Par défaut sur CIROS, les simulations sont contrôlées par l'API virtuel interne, or dans notre cas, il faut que la station de distribution soit contrôlée par PLCSIM qui joue le rôle d'un API virtuel externe. Afin que cela soit possible, nous changeons le contrôleur de la station de distribution sur CIROS, en procédant comme suite :

1) Sur la barre de menu, cliquer sur « MODELING » puis « PLC SWITCH »

- 2) Une fenêtre s'ouvre dans laquelle apparait le contrôleur utilisé sur la deuxième colonne ainsi que d'autres informations relatives aux APIs et leurs programmes respectifs. En effectuant un clic droit il est possible de changer le type de contrôleur sur « SWITCH DIRECTLY TO » ensuite dans notre cas nous sélectionnons « OPC ». Ainsi, dès que la simulation est lancée un OPC client est créé. (Voir la **Figure III-8**)

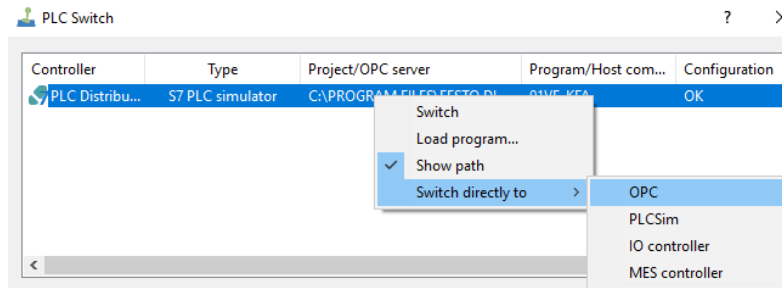


Figure III-8 : Fenêtre de PLC Switch sur CIROS

Étape 4 :

Ouvrir EzOPC et s'assurer que CIROS est connecté à PLCSIM via le Virtual Controller, et aussi que les drivers OPC et PLCSIM sont bien installés (voir la **Figure III-9**)

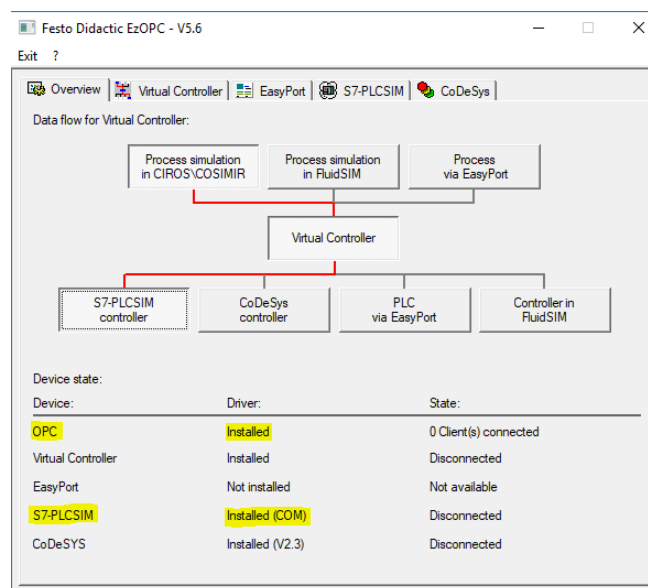


Figure III-9 : Interface EzOPC

Il faut aussi s'assurer que sur l'onglet S7-PLCSIM de EzOPC, la plage d'adressage des entrées/sorties soit la même que sur le programme Step7 (voir **Figure III-10**)

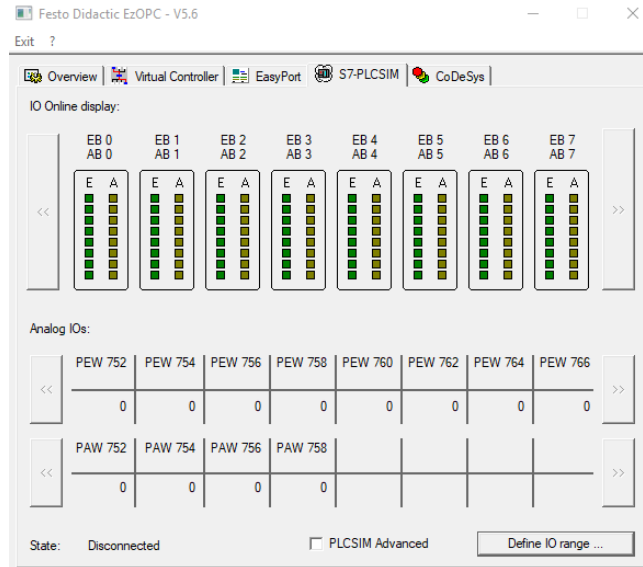


Figure III-10 : Configuration des adresses entrées /sorties

Etape 5 :

- 1) Lancer PLCSIM et charger le programme.
- 2) En lançant la simulation sur CIROS, celui-ci est détecté sur EzOPC comme étant un OPC Client. Rendant ainsi possible de commander les entrées/sorties directement à partir de PLCSIM.

Important : Bien s'assurer que le Virtual Controller et S7 PLCSIM sont bien connectés comme indiqué sur la Figure III-11

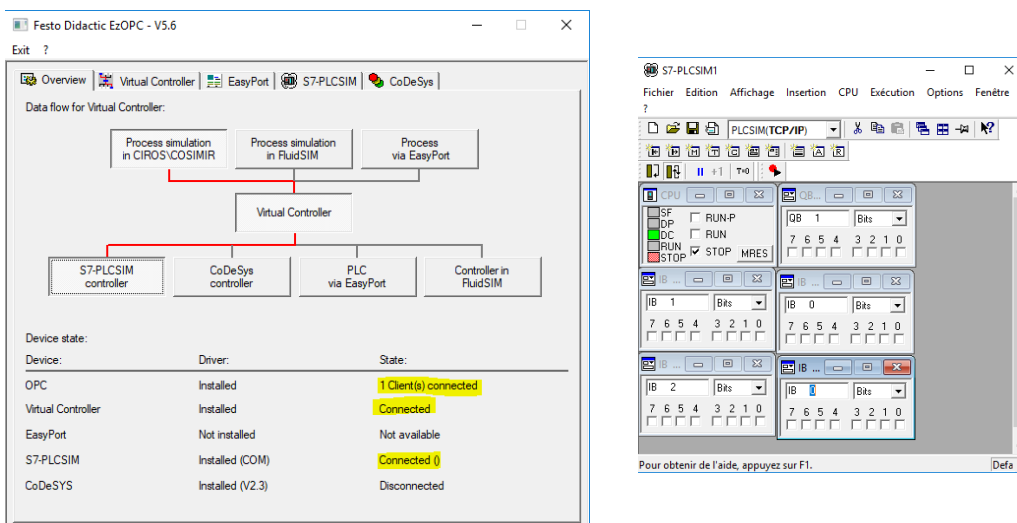


Figure III-11 : Interface EzOPC et PLCSIM lors de la simulation

On peut de la même façon, commander la simulation sur CIROS avec un API réel en utilisant l'émulateur EasyPort (**Figure III-12**) qui est branché directement avec le câble des données des entrées/sorties (Connecteur SysLink) de la station, en modifiant préalablement la configuration sur l'interface EzOPC (PLC via EasyPort).



Figure III-12 : Emulateur EasyPort

Remarque : L'émulateur EasyPort permet aussi de commander une station (réel) via le PLCSIM, ainsi, en l'absence d'un automate réel, il est possible d'utiliser un automate virtuel (PLCSIM, CoDeSys, FluidSim) comme alternative à ce dernier.

3. Réalisation du Digital Twin

Dans cette étape du projet nous allons voir en détails comment mettre en place une communication entre le logiciel FESTO pour la simulation du processus « CIROS » et une chaîne FESTO réelle « MPS 500 » en passant par un OPC server « KepServer » ainsi que toutes les configurations et les affectations nécessaires, il est à noter que cette méthode nous a été inspiré par les travaux d'Olivier Cardin dans sa thèse de doctorat « Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – Application à un système flexible de production » [28]

Le principe général de cette opération est le suivant :

Collecter les informations souhaitées (données) dans OPC Server, qui se présentent sous forme d'entrées/sorties digitales ou/et analogiques depuis les API (automates programmables industriels), puis les exploiter selon le besoin, dans notre cas les utiliser afin d'établir un Digital Twin sur CIROS (voir **Figure III-13**)

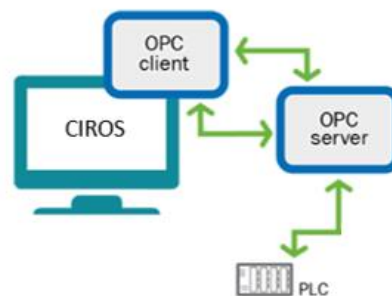


Figure III-13 : Principe de fonctionnement

3.1. Configuration API

Afin de permettre au serveur OPC d'accéder aux données, une configuration du réseau est impérative. Chaque CPU doit avoir sa propre adresse pour éviter toute confusion ou collision entre les données.

Le choix du type de réseau dépend non seulement des CPU utilisés mais aussi des applications souhaitées.

Dans notre cas nous avons opté pour un réseau Ethernet TCP/IP vu la rapidité de la mise en place et la diversité de ses applications notamment l'internet des objets (IOT).

Remarque : notre choix des équipements (CPU, carte E/S ...), est conditionné par le matériel FESTO existant et par les adresses IP. Ceci dit, dans d'autres applications les différents équipements sont librement choisis.

Dans ce qui va suivre nous allons détailler les différentes étapes de configuration des CPU :

- Ouvrir un nouveau projet sur SIMATIC Step7 (**Figure III-14**)

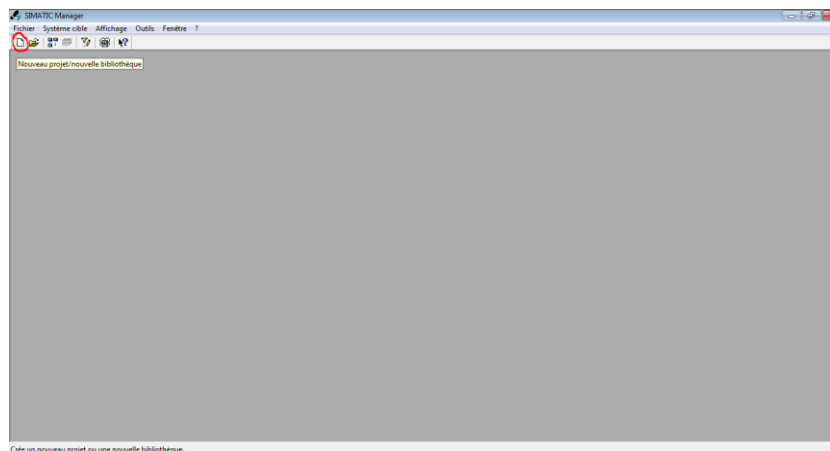


Figure III-14 : Interface STEP7

- Ajouter un nouvel objet (**Figure III-15**)

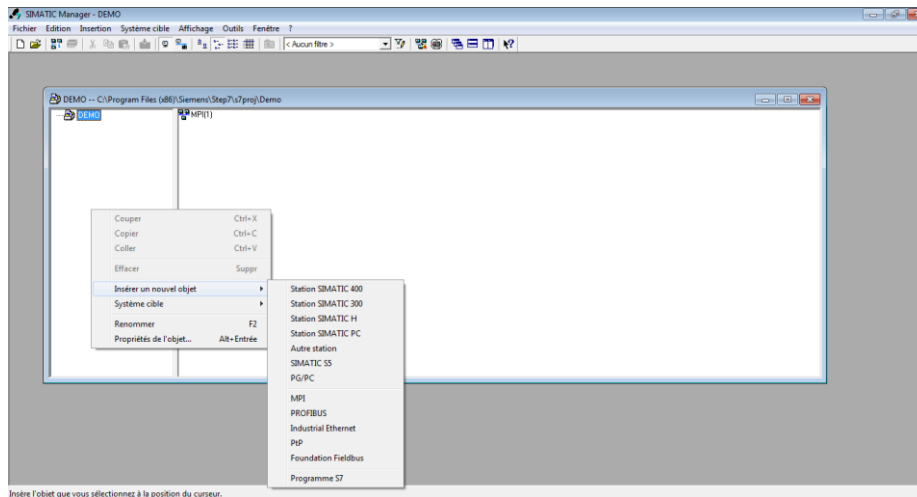


Figure III-15 : barre d'outils (ajouter un nouvel objet)

- Choisir le CPU ainsi que les différentes cartes d'entrées/sorties (ajouter un Rack en premier (Figure III-16, Figure III-17)

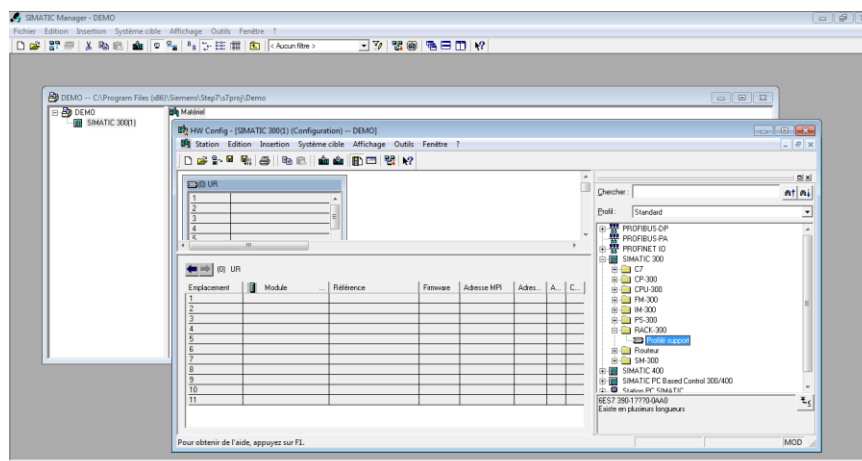


Figure III-16 : configuration matériel (choix du support)

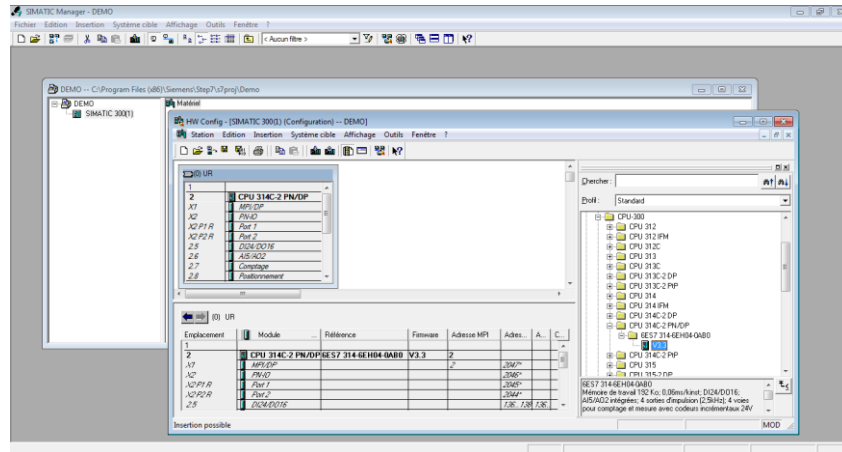


Figure III-17 : configuration matériel (choix du CPU)

Note : avant de fermer la fenêtre de configuration il faut enregistrer et compiler (Figure III-18)

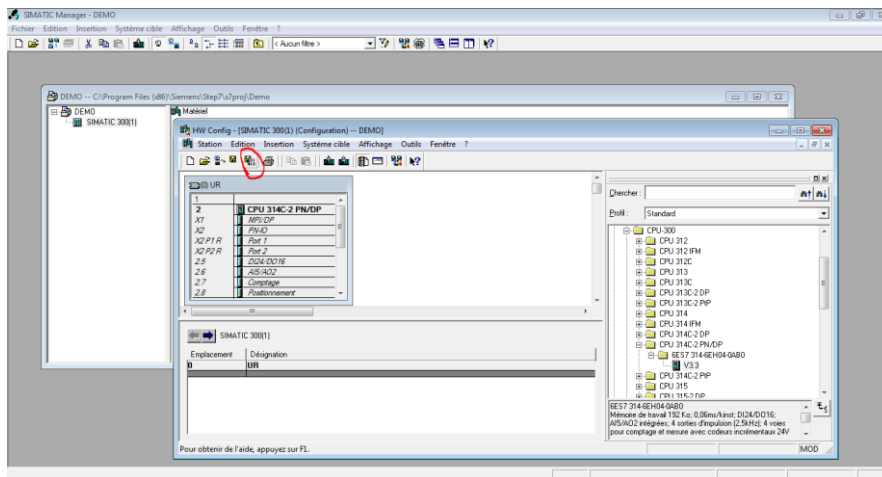


Figure III-18 : Configuration matériel (compilation)

- Si votre chaîne de production contient plusieurs APIs, il faut les ajouter dans le même projet.
- Une fois tous les API ajoutés et renommés il faut procéder à la configuration du réseau, les procédures sont décrites sur la Figure III-19

Note : Dans notre cas nous avons configuré un réseau Ethernet en veillant toujours à compiler et à enregistrer avant de quitter.

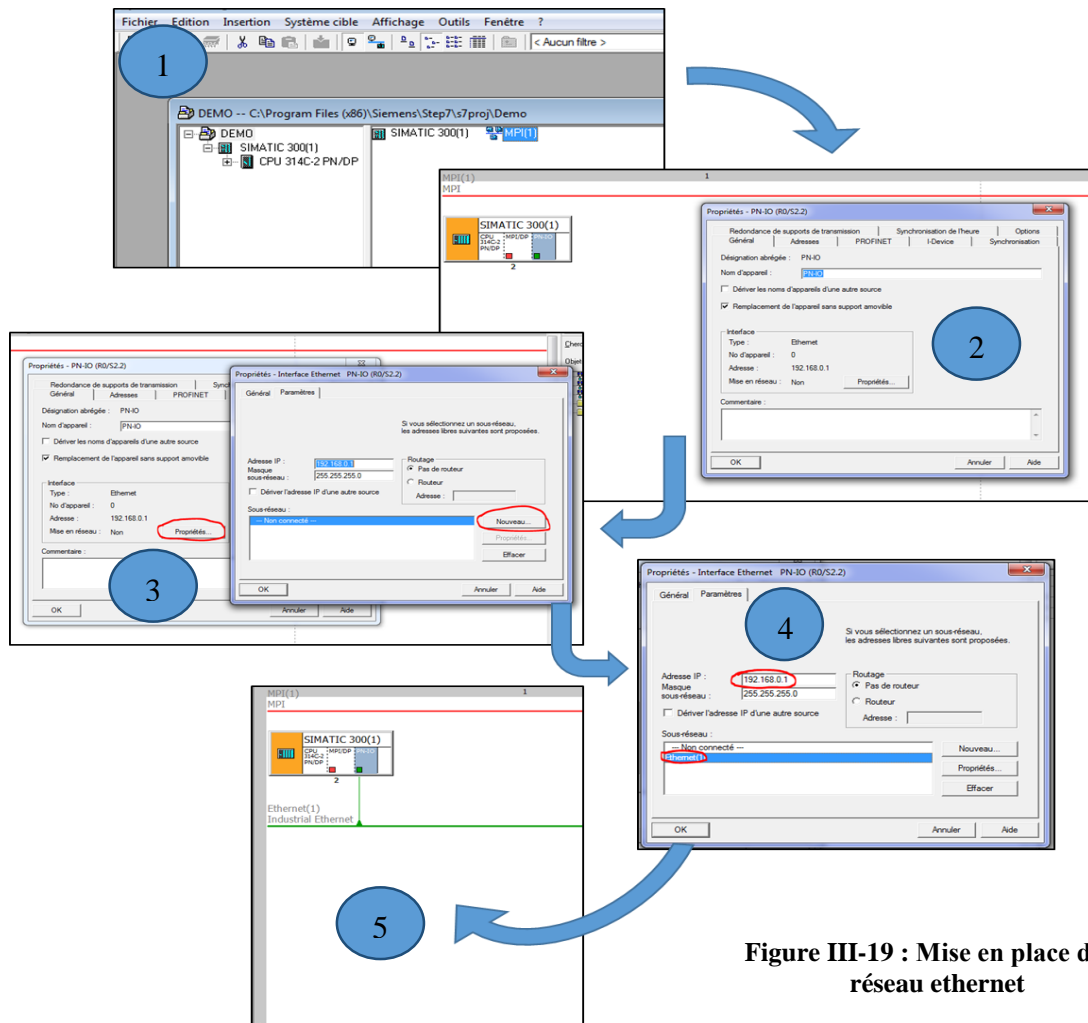


Figure III-19 : Mise en place d'un réseau ethernet

- Une fois tous les réglages terminés, la structure du réseau devrait être comme dans la Figure III-20.

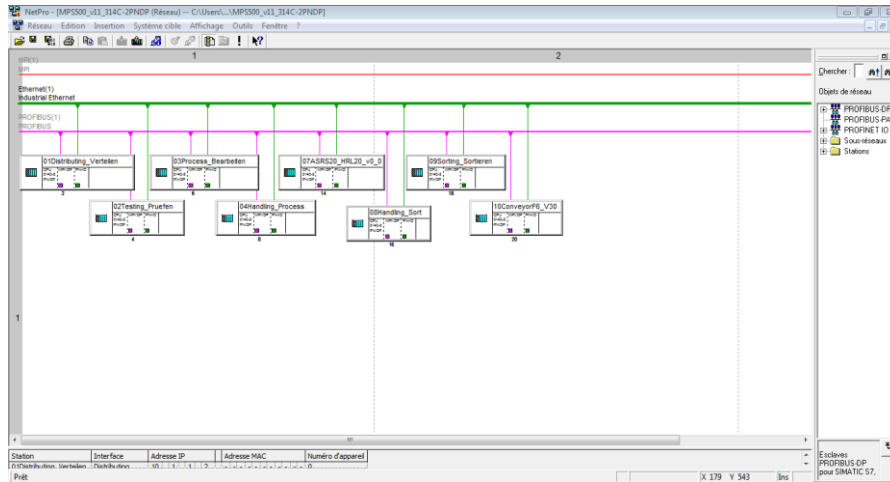


Figure III-20 : structure du réseau des APIs

3.2. Configuration OPC Server « KepServer »

Dans cette étape nous allons définir les différents canaux d'accès aux données ainsi que les différents adressages et les différentes autorisations.

Les étapes ci-dessous vont montrer comment procéder à cette configuration :

- Ouvrir un nouveau projet sous KepServer (**Figure III-21**)

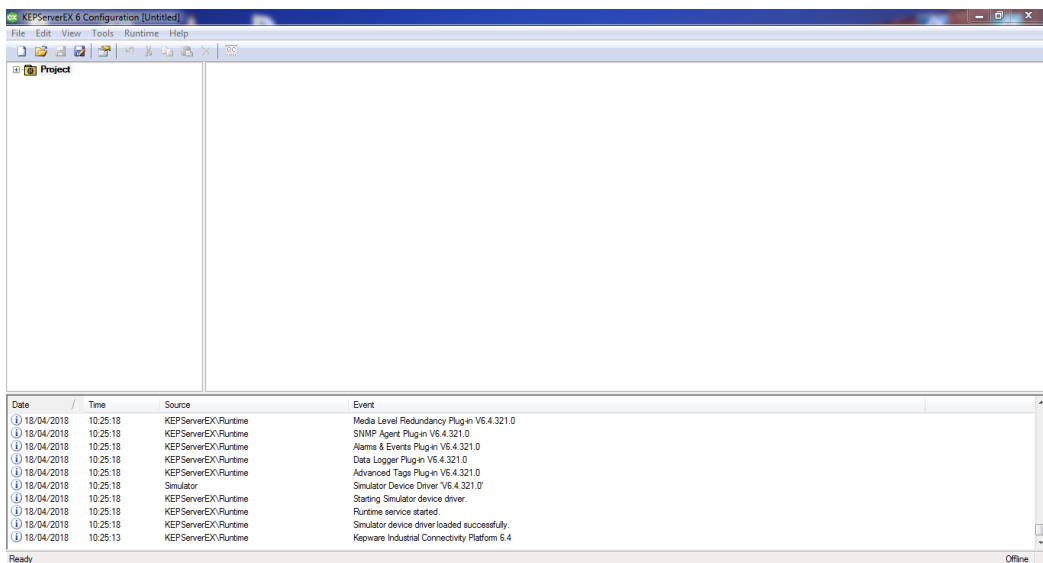


Figure III-21 : Interface kepservers

- Ajouter un nouveau chemin (**Figure III-22**), c'est-à-dire le chemin que le serveur doit suivre pour atteindre la source de l'information. Plusieurs chemins s'offrent à nous, nous

choisissons celui qui nous arrange puis procédons à un paramétrage standard (**Figure III-23**).

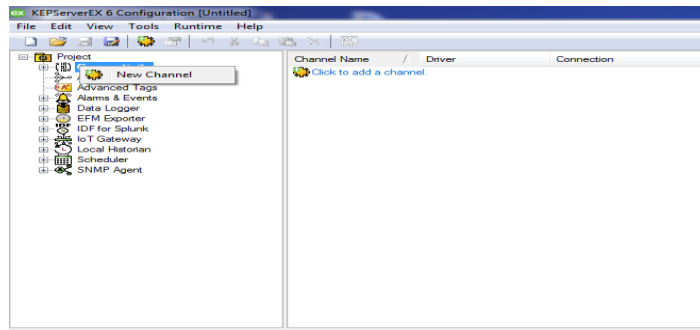


Figure III-22 : barre d'outils kepservers

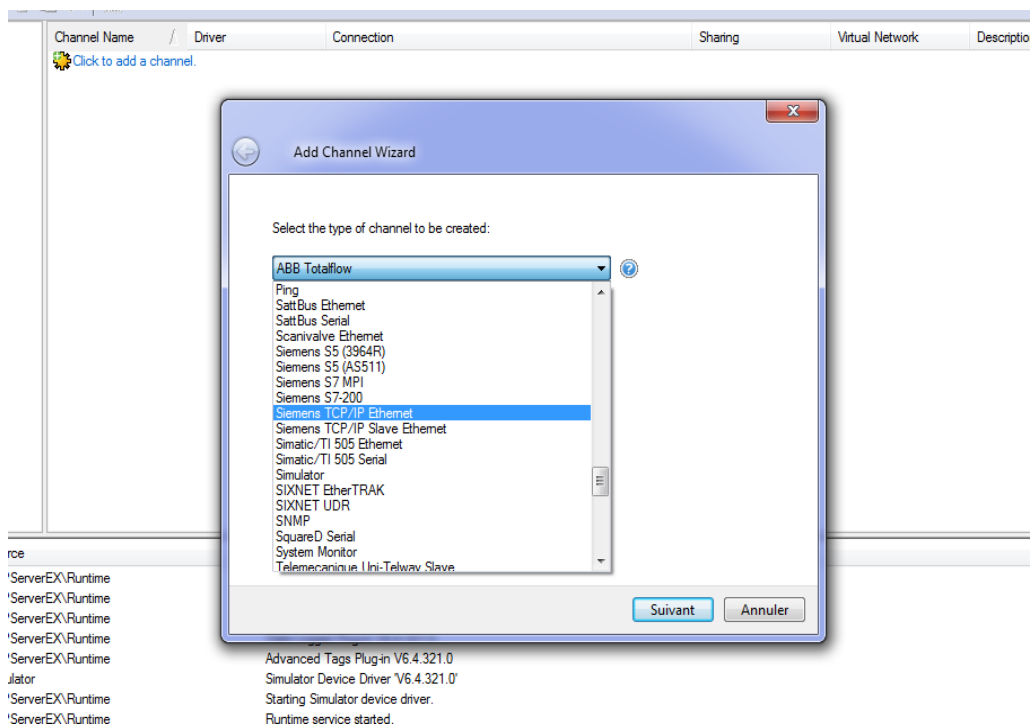


Figure III-23 : configuration matériel(choix du canal)

- Ajouter un appareil, dans notre cas un API. Entrer le nom et le modèle de l'appareil (**Figure III-24**).

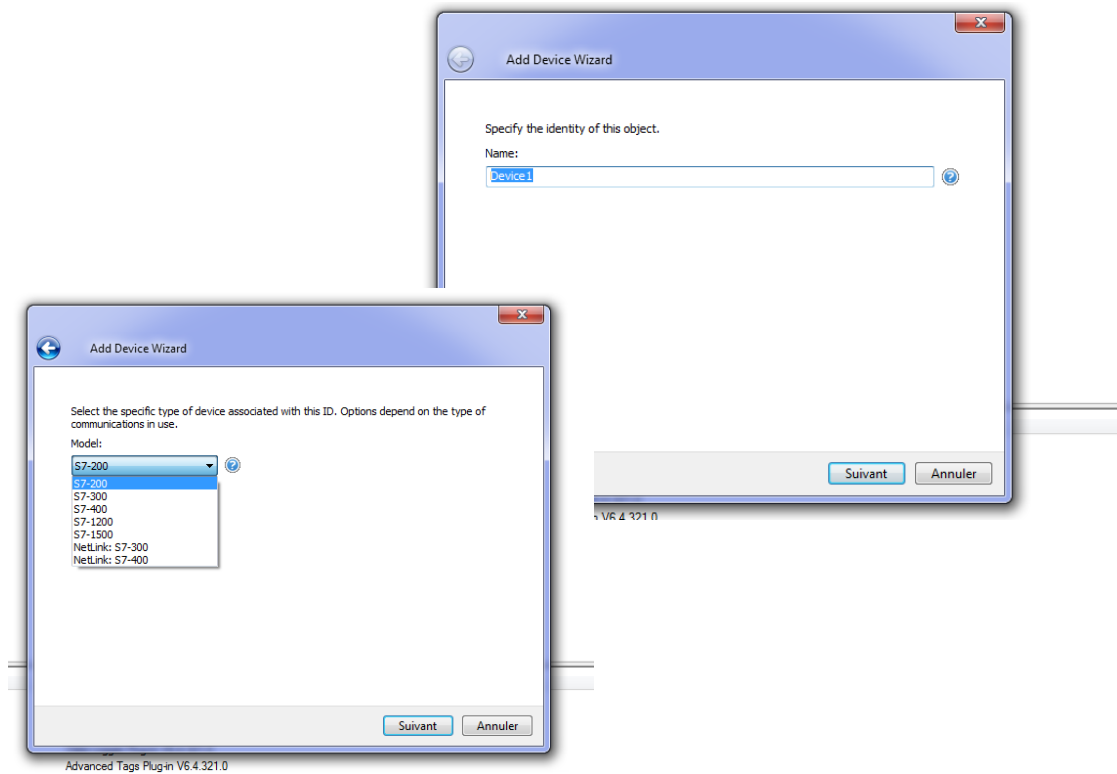


Figure III-24 : configuration matériel (choix de l'appareil)

- Spécifier l'adresse IP de chaque appareil (cette adresse doit être la même que celle introduite dans la configuration API).

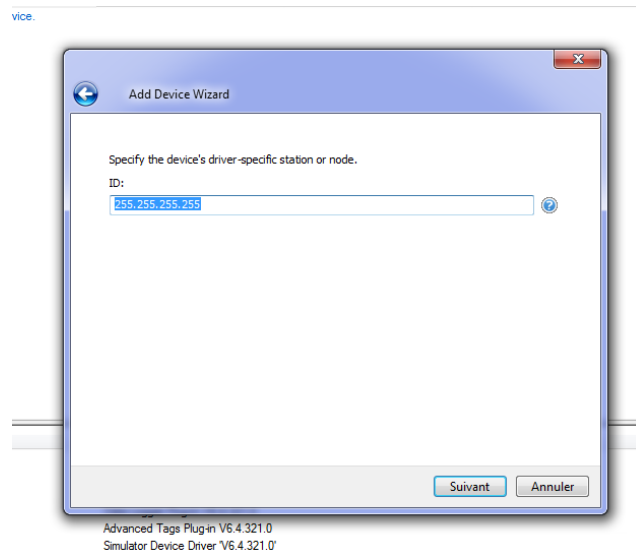


Figure III-25 : configuration matériel (adresse IP)

- Pour éviter toute confusion entre les entrées/sorties et aussi les erreurs d'adressage, il est préférable d'avoir recours au fichier du programme STEP7 (Figure III-26). Cette étape facilitera par la suite le choix des entrées/sorties que nous voulons exploiter.

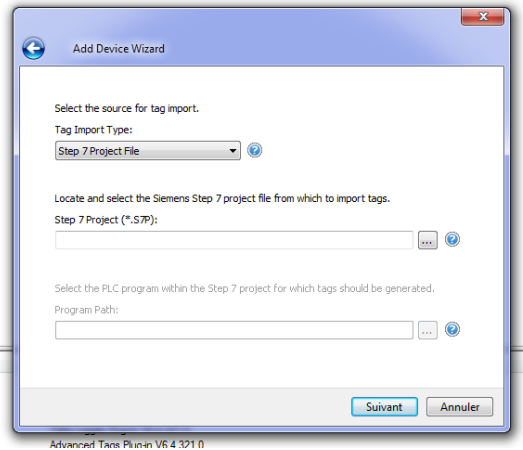


Figure III-26 : configuration matériel (chemin du fichier S7P)

- L'étape suivante, comme le montre la Figure III-27, est d'introduire les entrées/sorties en question, leurs adresses et leurs autorisations d'accès (lecture, écriture)

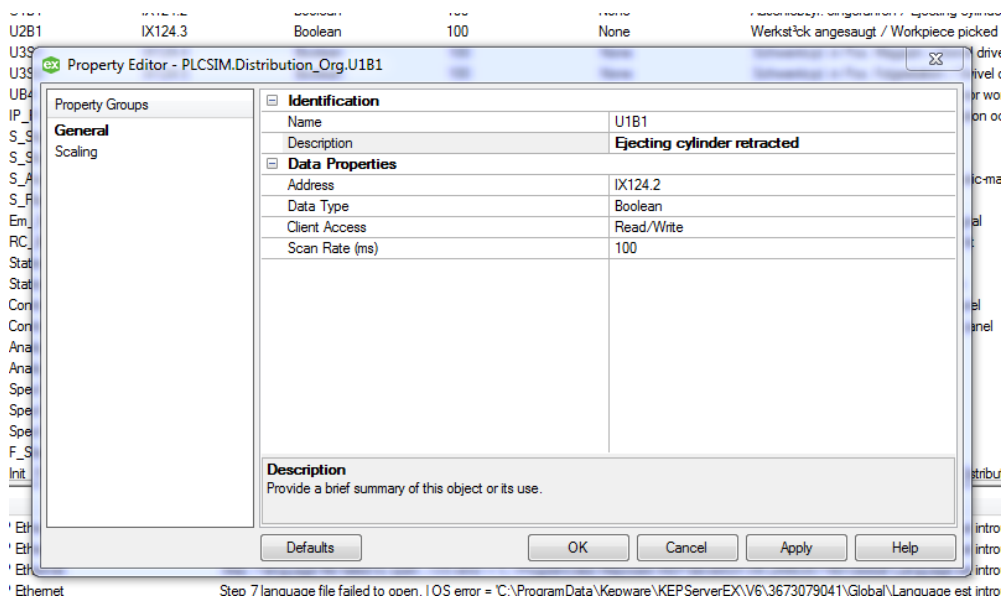


Figure III-27 : Configuration E/S kepservers

- A la fin de ces étapes la configuration de l'OPC server est terminée.

3.3. Configuration du modèle CIROS

Dans cette dernière étape nous allons mettre en place une partie de la chaîne MPS qui jouera le rôle du Digital Twin sous le logiciel CIROS cette opération va permettre le fonctionnement

parallèle et en temps réel des deux chaînes réel et virtuel. Plusieurs opérations d'affectations sont nécessaires pour arriver à cette fin.

- Ouvrir CIROS Studio et créer un nouveau modèle, nous choisirons par la suite les stations souhaitées (dans notre cas, la station de distribution dans un premier temps).
- Une fois le modèle ouvert, nous allons procéder à un paramétrage comme suit (voir **Figure III-28**) :
 - Aller dans l'onglet « MODELING », puis « PROPERTIES ».
 - Aller dans « CONTROL » se trouvant sur la partie générale des propriétés, puis sélectionner « OPC Client ».
 - Sélectionner le nom du serveur souhaité dans l'onglet « OPC Client ».
 - Dans « Items » nous allons trouver les entrées/sorties préalablement insérées.

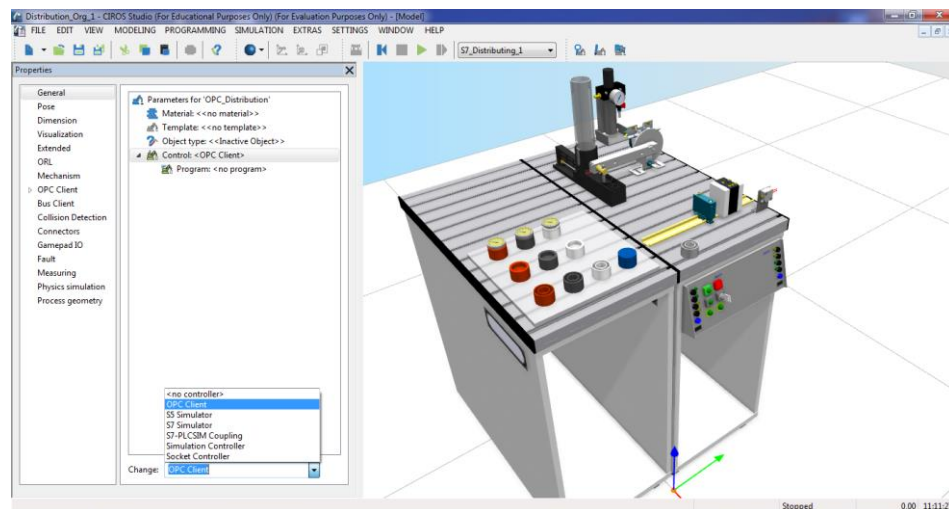


Figure III-28 :sélection du controlleur

- Les entrées/sorties OPC Client représentent les données nécessaires au fonctionnement du modèle et qui seront par la suite affectées aux entrées/sorties correspondants dans KepServer.

Note : il est préférable de mettre les mêmes noms des entrées/sorties, cela permettra une connexion automatique.

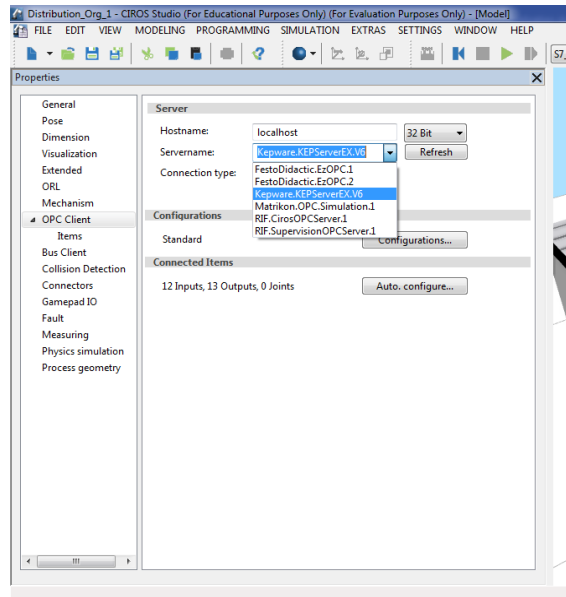


Figure III-29 :Sélection du nom du serveur

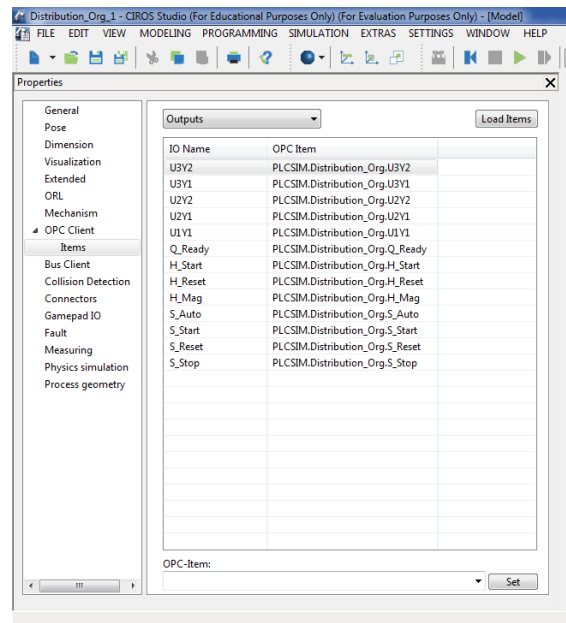


Figure III-30 : OPC inputs/Outputs

- A ce niveau, les données sont collectées dans CIROS depuis KepServer. Toutefois, il reste une dernière étape qui consiste à relier les données collectées avec la partie opérative du modèle.
- Dans l'onglet « MODELING », aller dans «Manual Operation», Relier chaque entrées/sorties du modèle avec les éléments correspondants du coté OPC Server (**Figure III-31**).

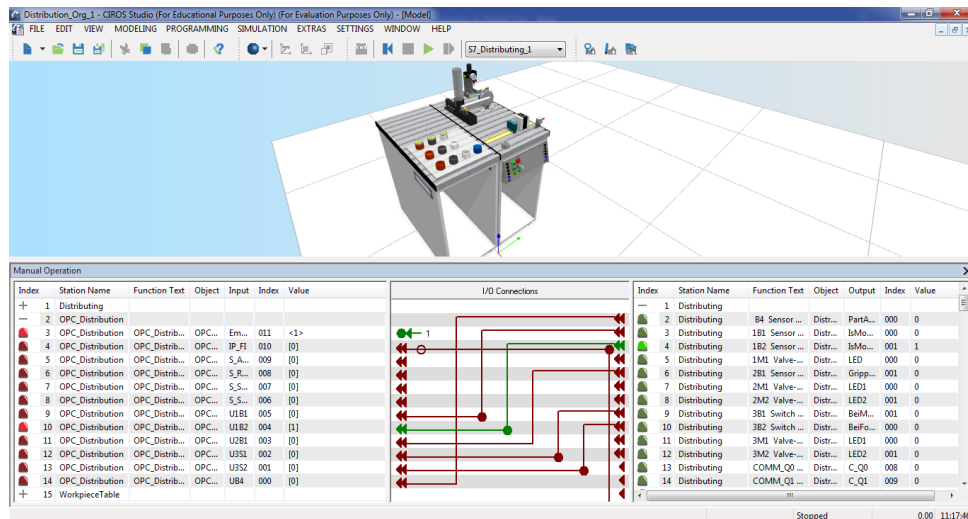


Figure III-31 : Manual operation

Il est maintenant possible de lancer la simulation sur CIROS, celui-ci va attendre que la station réelle soit mise en marche pour recevoir les données en temps réel via l'OPC Server lui permettant ainsi de reproduire sur la simulation exactement ce qui se passe sur la réalité. On peut donc dire que la simulation sur CIROS est un Digital Twin de la station de distribution.

4. Développement de travaux pratiques :

Nous avons développé des travaux pratiques qui consistent d'un côté, à familiariser l'étudiant aux équipements et machines industriels et à l'introduire aux automates programmables industriels et à leurs programmations en utilisant le logiciel CIROS. Ce logiciel va permettre l'immersion totale de l'étudiant dans le monde de l'automatique industrielle grâce à une interface simple et une visualisation en trois dimensions.

En effet, l'étudiant peut se voir évoluer et progresser en ayant à sa disposition une bibliothèque complète et diversifiée lui permettant ainsi de commencer avec des modèles basiques contenant quelques capteurs et actionneurs et de monter en complexité jusqu'à atteindre des modèles plus complexes (voir Figure III-32).

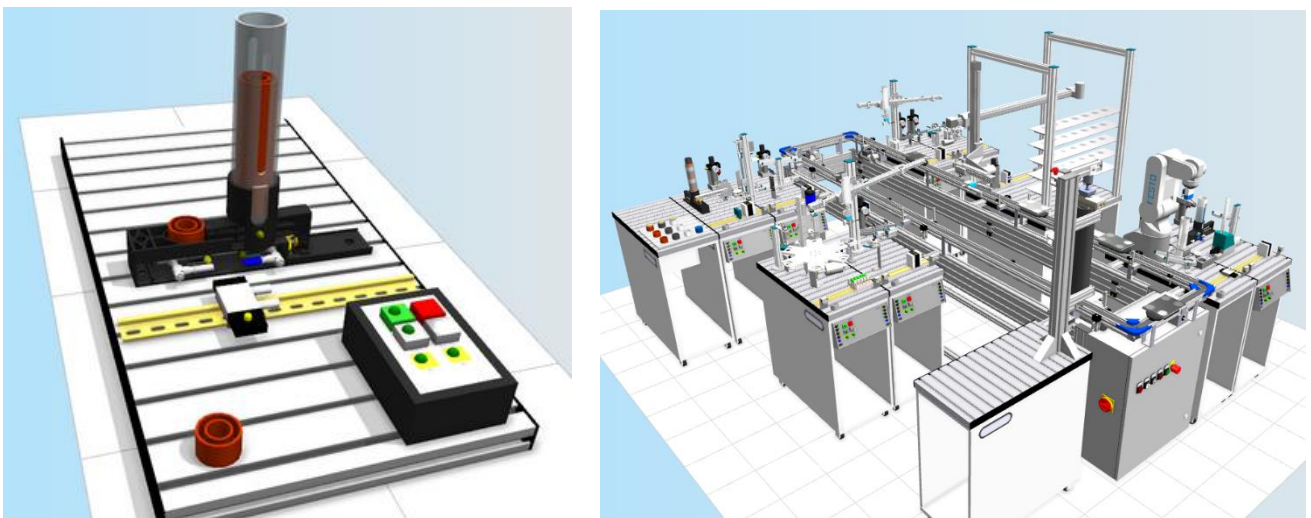


Figure III-32 : Modèles de systèmes automatiques sur CIROS

Ces TPs sont composés de deux parties, la première consiste à analyser l'ensemble des composants d'un modèle et son fonctionnement générale, le but est que l'étudiant se sente à l'aise et en confiance face aux différents capteurs et actionneurs qui composent le modèle, d'autant plus qu'il se sentira plus libre à expérimenter ses idées sachant qu'il est dans un environnement virtuel et sans risque.

La deuxième partie quant à elle, consiste à introduire l'étudiant dans la programmation des automates programmable industriels. Etant donné que CIROS permet de se connecter à des logiciels de programmation tels que Step7 ou TIA, l'étudiant aura donc la possibilité d'écrire ses propres programmes et de les simuler directement sur CIROS.

5. Conclusion :

Nous avons montré dans ce chapitre les différentes étapes de programmation, de simulation ainsi que celles de création du Digital Twin d'une ou de plusieurs stations de la MPS500. Alors que la majorité des documents trouvés dans la littérature abordent uniquement l'aspect théorique du Digital Twin, nous estimons avoir effectué un grand pas en se lançant sur cette réalisation avec du matériel et des logiciels récents et en utilisant une méthode efficace, nous avons réussi à obtenir une représentation virtuelle sur CIROS d'un comportement réel des stations (distribution, test, manipulation et tri) et ce en temps réel. L'avantage de la méthode que nous avons utilisée est qu'elle pourra être reproduite avec d'autres types d'équipements provenant d'autres constructeurs et aussi d'autres interfaces et logiciels (Simulation, ERP, MES...) ce qui ouvre de larges perspectives pour des travaux futurs.

Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans ce projet consiste en la création d'un Digital Twin d'une partie des stations de la MPS500 présente au niveau du laboratoire de productique (MELT) à la faculté de technologie de Tlemcen en utilisant le logiciel de simulation CIROS, en effet, les différentes révolutions industrielles abordées dans le premier chapitre montrent clairement la volonté de l'homme à toujours évoluer et à se surpasser, commençant par la machine à vapeur en passant par l'utilisation de l'électricité et les chaînes de montages, puis l'utilisation des automates et des bras robotisés et finalement l'usine intelligente où tout est connecté grâce aux technologies de l'informations et de la communication. Face à ces technologies et à un environnement de plus en plus complexe, la simulation de façon générale s'est imposée comme un outil essentiel dans les industries et deviendra indispensable dans les années à venir, de telle sorte qu'elle fusionnera progressivement avec la réalité pour la refléter (Digital Twin).

La deuxième partie de ce document introduit les outils utilisés et leur logique de fonctionnement, pour que finalement les différentes méthodes de programmations et de configurations soient abordées dans le troisième et dernier chapitre qui est sous forme de tutoriel expliquant les différentes démarches à suivre pour simuler des programmes sur CIROS dans un premier temps, puis la création et la configuration du Digital Twin en utilisant OPC, nous avons suite à ça, développé des TP d'automatique qui pourront se faire sur du matériel tel que les stations de la MPS500 ou les autres modèles de chez Festo et qui serviront à l'étudiant pour se familiariser avec les automates et leur programmation à l'aide du logiciel CIROS qui s'avère être un environnement complet offrant plusieurs fonctionnalités qui aideront certainement l'étudiant à apprendre de façon efficace et pratique.

La conclusion que nous pouvons tirer de ces travaux est qu'il est désormais possible de faire un Digital Twin des stations de la MPS500 ou d'autres chaînes de chez FESTO en utilisant le logiciel CIROS, comme il est possible d'utiliser les données récoltées de l'ensemble des stations dans d'autres plateformes telles que des ERP ou MES.

Une limitation est toutefois à signaler, en effet, on peut remarquer un certain décalage entre la simulation et la réalité, ce dernier est principalement visible sur les systèmes pneumatiques qui dans la réalité mettent plus de temps à réagir que dans la simulation et cela semble être tout à fait logique, de plus si un événement retarde ou avance le processus ou une partie de celui-ci se produit, le Digital Twin sur CIROS ne peut détecter cela et un certain décalage va alors s'installer et s'accumuler jusqu'à ce que les deux mondes (virtuel et réel) ne soient plus synchronisés. Afin de mieux comprendre prenons un exemple simple d'un Digital Twin d'un convoyeur qui transporte une pièce, quand cette dernière arrive au niveau du capteur elle s'arrête pour être écrasée par le vérin. Si dans le Digital Twin la pièce arrive au niveau du capteur plus tôt que dans la réalité (**Figure C-1**), celle-ci va automatiquement attendre que la pièce réelle soit à la même position pour que le vérin s'enclenche dans la réalité ainsi que sur le Digital Twin.

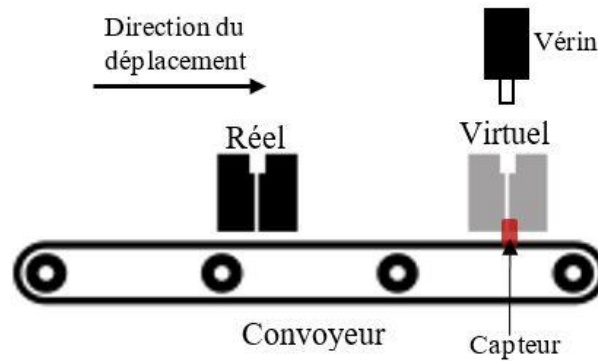


Figure C-1 : Pièce virtuelle en avance

Par contre, si c'est le cas contraire, c'est-à-dire que la pièce réelle arrive plus tôt au niveau du capteur que dans le Digital Twin (**Figure C-2**), le vérin va écraser la pièce réelle sans même se synchroniser avec le Digital Twin, par conséquent, on visionnera sur la simulation que le vérin s'est enclenché dans le vide et que la pièce virtuelle restera toujours en retard par rapport à la réalité, ainsi, les retards vont s'accumuler sur cette opération ainsi que sur les autres, et avec le temps le Digital Twin et la réalité seront complètement décalés.

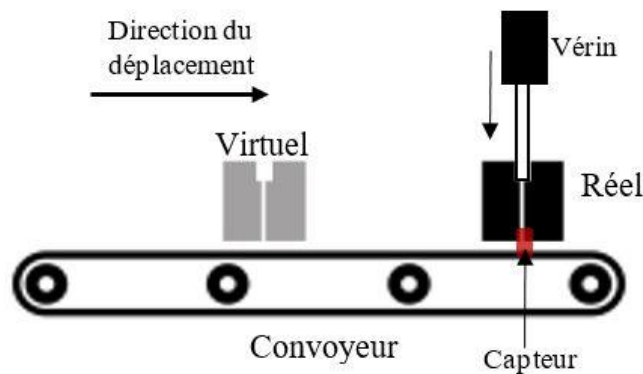


Figure C-2 : Pièce virtuelle en retard

D'où la perspective d'appliquer des modifications approfondies sur CIROS pour lui permettre de s'adapter et de se synchroniser automatiquement dès qu'un événement se produit sur le terrain, ce qui va permettre de garder une certaine fiabilité du Digital Twin au fil du temps. Une autre perspective qui complète la précédente, est celle de développer une intelligence artificielle capable de prédire ou de détecter un dysfonctionnement en se basant sur les données du Digital Twin, en effet, si par exemple un décalage se produit à plusieurs reprises dans un même endroit sur le Digital Twin, cela voudra dire qu'une anomalie est présente au niveau de cet emplacement dans la réalité, ce qui générera une alerte pour prévenir l'ingénieur ou l'opérateur et permettra donc d'agir en conséquence, et faire une maintenance prédictive.

Toujours sur les perspectives, nous proposons que le Digital Twin de l'intégralité du MPS500 soit réalisé, les stations avec un automate programmable ne posent pas problème et sont déjà faits dans nos travaux, le challenge se pose au niveau des autres stations telles que la station de contrôle qualité (la caméra) et la station d'assemblage (bras robotique) ainsi que le convoyeur

que nous n'avons pas eu le temps de réaliser, cette perspective pourra très bien faire l'objet d'un autre projet de master pour les promotions à venir.

D'autres orientations peuvent aussi être toutes aussi intéressantes, comme la création d'un module sur un ERP ou un MES ou même sur Excel pour la supervision et le contrôle de la chaîne en temps réel, sur celui-ci l'information sera uniquement représentées sous forme numérique et graphique contrairement au Digital Twin.

Finalement, nous proposons que d'autres travaux pratiques soient développés sur CIROS notamment dans la robotique, ce dernier permet en effet la programmation et la simulation de robots industriels de différents constructeurs ce qui permettra d'être à jour sur les nouvelles méthodes de programmation des robots actuels.

Référence bibliographique :

- [1] C. Schönfelder, *Muße – Garant für unternehmerischen Erfolg*. 2018.
- [2] Patrick Criqui, “La quatrième révolution industrielle sera verte ou ne sera pas !” [Online]. Available: <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/la-quatrieme-revolution-industrielle-sera-verte-ou-ne-sera-pas-558386.html>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [3] Vincent, “L’ère des sociétés industrielles - Vincent S.H 406 - ThingLink.” [Online]. Available: <https://www.thinglink.com/scene/707326786718924800>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [4] “Robots industriels: ils savent (presque) tout faire.” [Online]. Available: <https://www.industrie-techno.com/robots-industriels-ils-savent-presque-tout-faire.33093>. [Accessed: 14-Mar-2018].
- [5] “Industry 4.0 | Festo Corporate.” [Online]. Available: <https://www.festo.com/group/en/cms/10966.htm>. [Accessed: 14-Apr-2018].
- [6] “GTAI - Industrie 4.0 – What is it?” [Online]. Available: <https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Industries/Industrie-4-0/Industrie-4-0/industrie-4-0-what-is-it.html>.
- [7] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, “Design principles for industrie 4.0 scenarios,” in *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2016, vol. 2016–March, pp. 3928–3937.
- [8] T. Bidet-Mayer, *L’industrie du futur : une compétition mondiale*. 2016.
- [9] P. I. 4.0, “Plattform Industrie 4.0 - What is Industrie 4.0?,” 2018. [Online]. Available: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>. [Accessed: 19-Apr-2018].
- [10] J. Smit, S. Kreuzer, C. Moeller, and M. Carlberg, “Industry 4.0,” 2016.
- [11] Q. Qi and F. Tao, “Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018.
- [12] M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, and J. Romann, “Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-based Systems Engineering for Industry 4.0,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018.
- [13] M. Rüßmann *et al.*, “Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing,” *Bost. Consult.*, no. April, pp. 1–5, 2015.
- [14] FESTO, “BionicCobot | Festo Corporate.” [Online]. Available: <https://www.festo.com/group/en/cms/12746.htm>. [Accessed: 19-Apr-2018].
- [15] “Homme, organisation et transformation numérique Intégration verticale et horizontale,” 2015.
- [16] GE, “Everything You Need to Know About the Industrial Internet of Things (IIoT) | GE Digital.” [Online]. Available: <https://www.ge.com/digital/blog/everything-you-need-know-about-industrial-internet-things>. [Accessed: 19-Apr-2018].

- [17] R. a. Grier, H. Thiruvengada, S. R. Ellis, P. Havig, K. S. Hale, and J. G. Hollands, “Augmented Reality - Implications toward Virtual Reality, Human Perception and Performance,” *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol. 56, no. 1, pp. 1351–1355, 2012.
- [18] M. Grieves and J. Vickers, “Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems,” in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 2016, pp. 85–113.
- [19] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, “About the importance of autonomy and Digital Twins for the future of manufacturing,” in *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 567–572.
- [20] GE, “Digital Twins: The Bridge Between Industrial Assets and the Digital World | GE Digital.” [Online]. Available: <https://www.ge.com/digital/blog/digital-twins-bridge-between-industrial-assets-and-digital-world>.
- [21] B. Marr, “What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important?,” 2017. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/#679e16b02e2a>.
- [22] A. Parrott and W. Lane, “Industry 4.0 and the Digital Twin,” *Deloitte University Press*, May-2017. [Online]. Available: <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>. [Accessed: 15-Mar-2018].
- [23] F. Tao and M. Zhang, “Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20418–20427, 2017.
- [24] Matthew Mikell and Jen Clark, “Cheat sheet: What is Digital Twin? Internet of Things blog,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-cheat-sheet-digital-twin/>.
- [25] ORACLE WHITE PAPER, “Digital Twins for IoT Application,” 2017.
- [26] “What is OPC? - OPC Foundation.” [Online]. Available: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>.
- [27] “Products | Drivers | Suites | Plug-Ins | Kepware.” [Online]. Available: <https://www.kepware.com/en-us/products/>.
- [28] O. Cardin, “Apport de la simulation en ligne dans l’aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – Application à un système flexible de production,” IUT de Nantes, 2007.

Résumé

Ce projet porte sur l'implémentation d'un Digital Twin des stations commandées par des automates sur la chaîne flexible MPS500 avec le logiciel de simulation CIROS en utilisant le standard OPC. En effet, le Digital Twin est une reproduction virtuelle du comportement d'un système réel en temps réel, il est considéré comme étant l'un des principaux piliers sur lesquels repose la quatrième révolution industrielle ou l'industrie 4.0.

La première partie du document consiste à « planter le décor » en parlant des différentes révolutions industrielles et en se focalisant sur l'industrie 4.0 et des technologies qui la compose, pour finalement définir et décrire la notion du « Digital Twin » ou « jumeau numérique ».

La deuxième partie quant à elle contient les différents outils logiciels et matériels que nous avons utilisé pour la réalisation du Digital Twin.

Et finalement, la troisième et dernière partie est un tutoriel qui montre étape par étape les différentes manipulations pour la création du Digital Twin des stations.

Abstract

This project concerns the implementation of a Digital Twin of the stations controlled by PLCs on the MPS500 flexible manufacturing system, using CIROS simulation software and OPC standard. Indeed, the Digital Twin is a virtual reproduction of a real system behaviour in real time, it is considered to be one of the main pillars on which the fourth industrial revolution or industry 4.0 is based.

The first part of the document consists of "setting the scene" by talking about the different industrial revolutions and by focusing on industry 4.0 and the technologies that compose it, to finally define and describe the notion of "Digital Twin".

The second part contains the various software and hardware tools we used for the realization of the Digital Twin.

And finally, the third and last part is a tutorial that shows step by step the different manipulations for the realization of the stations Digital Twin.

Annexe : Travaux pratiques

TP 1 : Station de distribution

1- Présentation CIROS :

CIROS est un logiciel de simulation 3D fournissant des modèles préconfigurés qui représentent des processus automatisés de production à différents niveaux de complexité.

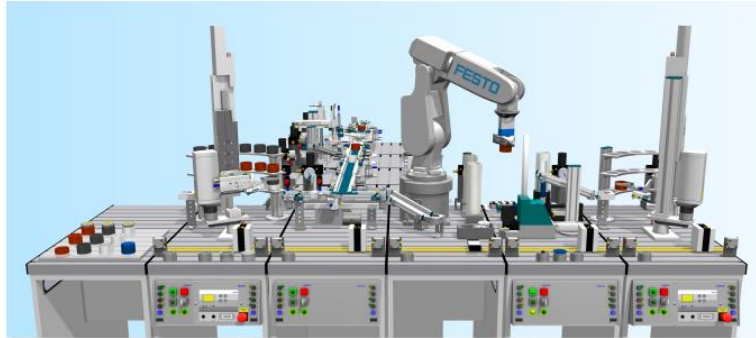


Figure 1 : CIROS

CIROS permet :

- **La programmation des robots :**
CIROS met à disposition de l'utilisateur plusieurs robots de différentes marques (MITUBISHI, KUKA, ABB...) Avec des cours, formations et vidéos qui vont permettre d'apprendre la manipulation et la programmation des robots d'une façon simple et efficace.
- **La programmation des API (Automates programmables industriels) :**
CIROS offre un environnement de travail idéal pour l'apprentissage et la programmation des API (majoritairement SIEMENS S7), en mettant à la disposition de l'utilisateur une interface facile et intuitive par laquelle beaucoup de données sont mis en évidence pour que l'utilisateur puisse avoir le maximum de feedback concernant l'état du système sur lequel il travaille. S'ajoute à cela le fait que CIROS est compatible avec différentes autres plateformes qui vont permettre d'exécuter des programmes directement en utilisant des outils tel que OPC (pour connecter avec STEP7 ou TIA PORTAL par exemple) ou le câble EasyPort (pour connecter le système virtuel de CIROS directement avec un automate réel).
- **La planification et le contrôle de la production :**
CIROS permet de relier la simulation avec un contrôleur d'ordre supérieur des systèmes réels, en mettant l'accent sur la planification des usines de production, la logistique interne et la conception et optimisation de MES (Manufacturing Execution Systems) ainsi que la gestion de la production.

2- Chargement de la chaîne de distribution :

a. Présentation de la station de distribution :

La station de distribution sépare les pièces à usiner du module de magasinage à empilage. 8 pièces maximum se trouvent dans le module de magasinage à empilage. Le niveau de remplissage du magasin à empilage est contrôlé par une barrière opto-électronique unilatérale. Un vérin à double effet éjecte les pièces à usiner une à une.

Le module de transfert saisit chaque pièce séparée au moyen d'une ventouse. Le bras du module de transfert, commandé par un vérin oscillant, amène la pièce à usiner au point de transfert de la station en aval.

b. Manipulations :

Pour accéder au modèle et à la documentation de la station de distribution :

- 1) Lancer CIROS
- 2) Cliquer sur « HELP » puis « Content » (Figure 2), Une nouvelle page s'ouvrira (Figure 3)

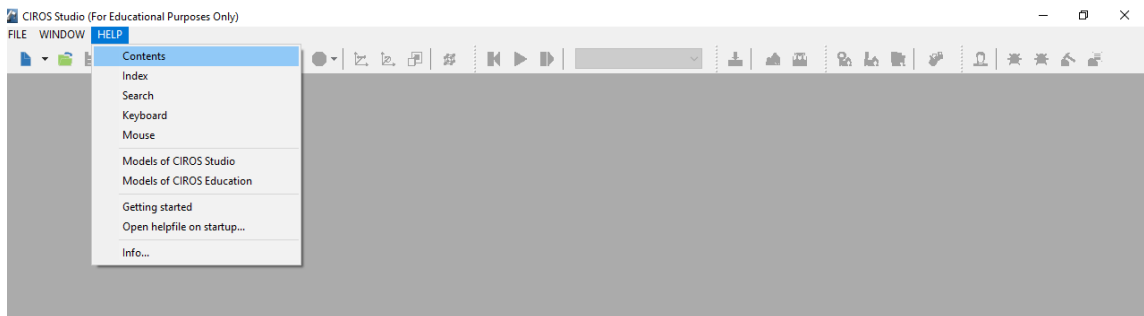


Figure 2 : Barre des menus CIROS

- 3) Ouvrir le dossier « CIROS Education » puis « programmation API » et finalement « Station MPS »
- 4) Parmi les différentes station MPS cliquer sur « station de distribution »
- 5) Pour ouvrir le modèle sur CIROS Appuyer sur « ouvrir le modèle de référence »

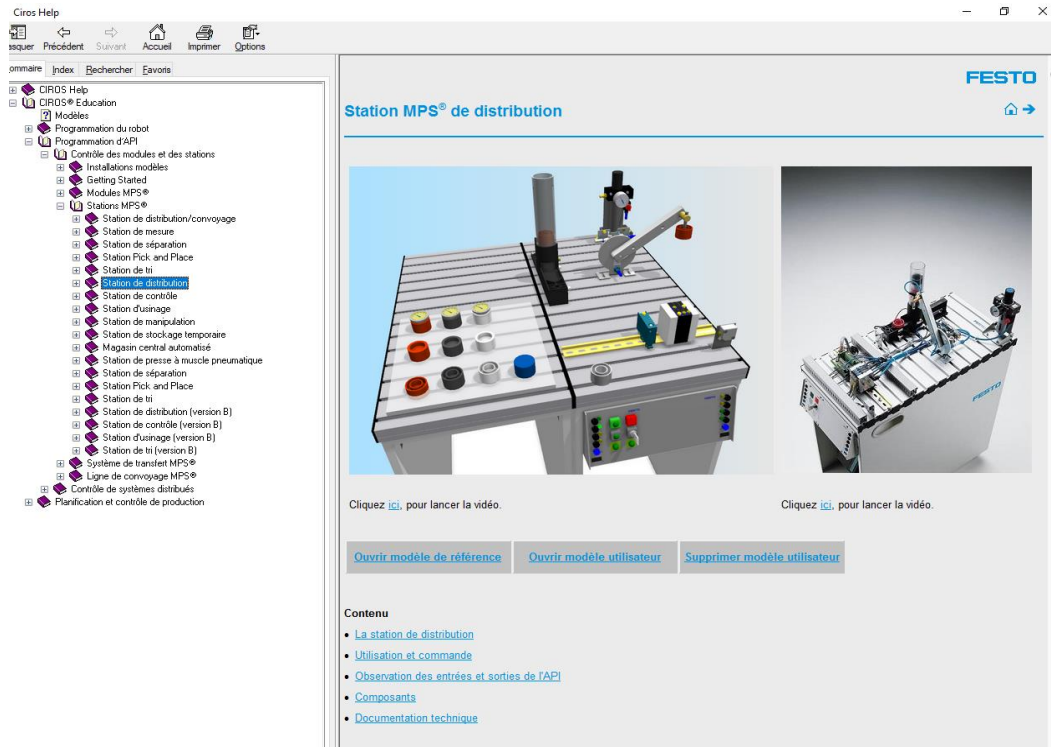


Figure 3 : Rubrique HELP de CIROS

- 6) Lancer la simulation et analyser le fonctionnement de la station de distribution.
- 7) Pour contrôler manuellement et voir les états des entrées/sorties :
 - Dans la barre des menus, cliquer sur « **Modeling** » puis « **IO Panel** »
 - Pour modifier l'état d'un capteur ou actionneur, clic droit sur celui-ci puis « set » pour passer à 1 et « reset » pour passer à 0

Remarque : pour revenir en mode automatique, il faudra fermer le « **IO Panel** ».

3- Programmation de la station de distribution :

Symbol	Adresse	Type	Description
1M1	A 0.0	bool	Ejecting cylinder push out workpiece
2M1	A 0.1	Bool	Vacuum on
2M2	A 0.2	Bool	Ejection impulse on
3M1	A 0.3	Bool	Swivel drive to magazine
3M2	A 0.4	Bool	Swivel drive to downstream station
P1	A 1.0	Bool	Start indicator light
P2	A 1.1	Bool	Reset indicator light
P3	A 1.2	Bool	Magazine empty indicator light
1B2	E 0.1	Bool	Ejecting cylinder extended
1B1	E 0.2	Bool	Ejecting cylinder retracted
2B1	E 0.3	Bool	Workpiece picked up
3B1	E 0.4	Bool	Swivel drive in pos. magazine
3B2	E 0.5	Bool	Swivel drive in pos. downstream station
B4	E 0.6	Bool	Sensor magazine empty
IP-FI	E 0.7	Bool	Downstream station free
S1	E 1.0	bool	Start button
S2	E 1.1	Bool	Stop button (normally closed)
S3	E 1.2	Bool	Automatic-manual switch
S4	E 1.3	Bool	Reset button
Em-Stop	E 1.5	Bool	Emergency stop unlocked

Tableau 1:Table des entrées/sorties

4- Test du programme:

- 1) Pour charger le programme il faut aller sur le volet « PROGRAMMING », puis cliquer sur « S7_Programming » (voir Figure 4)

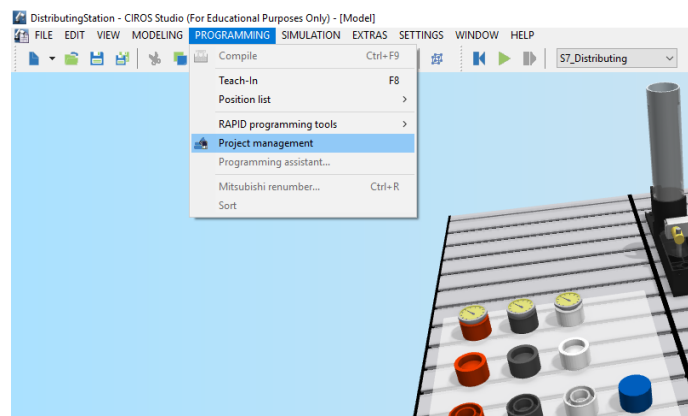


Figure 4 : Barre des menus sur CIROS

- 2) Un tableau de bord s'affichera dans lequel on peut lire « Controllers », en double cliquant dessus le programme par défaut qui commande la station (S7_Distributing) apparaît.

- 3) Pour charger le programme, clic droit sur « Program » puis « Load » (comme indiqué sur la Figure 5) et finalement sélectionner le fichier dans lequel est sauvegardé le programme (format.s7p)

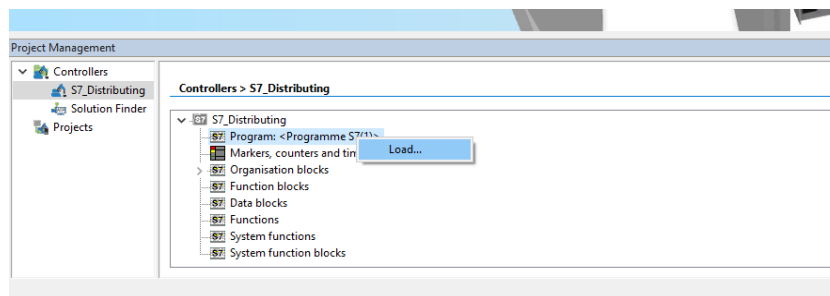


Figure 5 : Fenêtre des contrôleurs sur CIROS (API Virtuel)

- 4) Lancer la simulation, et visualiser le fonctionnement.

Remarque :

Cette méthode ne fonctionne qu’avec les programmes sous le format S7P, et donc on ne peut pas programmer avec TIA PORTAL, seule SIMATIC Step7 sauvegarde ses fichiers sous ce format.

Travail demandé :

En vous basant de la table des entrées/sortie ci-dessus (Tableau 1), écrire sur SIMATIC Step7 le programme qui permet de reproduire le fonctionnement de référence de la station de distribution et le tester sur CIROS.

TP 2 : Station de test/contrôle

1- Chargement de la station de contrôle :

a. Présentation de la station de contrôle :

La station de contrôle détermine les caractéristiques des pièces à usiner posées. Un capteur capacitif identifie chaque pièce à usiner indépendamment de sa couleur. Une barrière à réflexion surveille si la zone de travail située au-dessus du réceptacle est libre avant que la pièce à usiner ne soit soulevée par le module de levage.

Un vérin linéaire achemine les pièces conformes vers la station en aval en empruntant la glissière à coussin d'air supérieure.

b. Manipulations :

Pour accéder au modèle et à la documentation de la station de contrôle/test :

- 1) Lancer CIROS
- 2) Cliquer sur « HELP » puis « Content » (Figure 1), Une nouvelle page s'ouvrira comme indiqué sur la Figure 2.

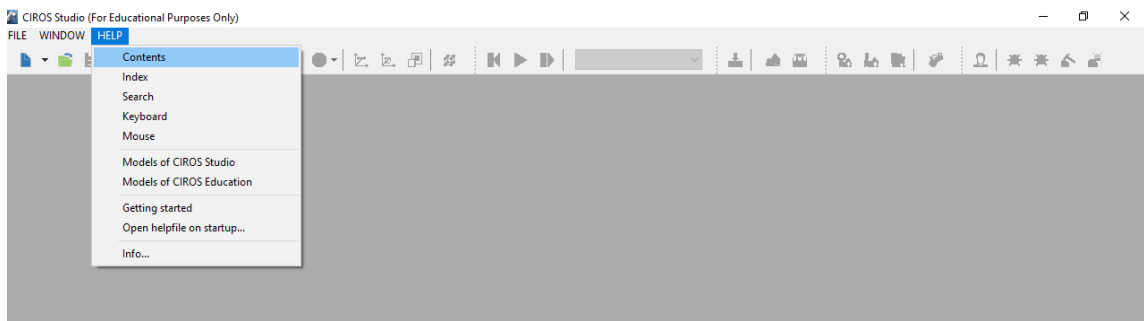


Figure 1 : Barre des menus sur CIROS

- 3) Ouvrir le dossier « CIROS Education » puis « programmation API » et finalement « Station MPS »
- 4) Parmi les différentes station MPS cliquer sur « station de contrôle/test »
- 5) Pour ouvrir le modèle sur CIROS Appuyer sur « ouvrir le modèle de référence »



Figure 2 : Rubrique HELP de CIROS.

Lancer la simulation et analyser le fonctionnement de la station de contrôle/test.

- 6) Pour contrôler manuellement et voir les états des entrées/sorties :
 - Dans la barre des menus, cliquer sur « **Modeling** » puis « **IO Panel** »
 - Pour modifier l'état d'un capteur ou actionneur, clic droit sur celui-ci puis « set » pour passer à 1 et « reset » pour passer à 0

Remarque : pour revenir en mode automatique, il faudra fermer le « **IO Panel** ».

2- Programmation de la station de contrôle/test :

Symbol	Adresse	Type	Description
1M1	A 0.0	bool	Lower lifting cylinder
1M2	A 0.1	Bool	Raise lifting cylinder
2M1	A 0.2	Bool	Extend ejecting cylinder
3M1	A 0.3	Bool	air slide on
IP_N_FO	A 0.7	Bool	station occupied
P1	A 1.0	Bool	Start indicator light
P2	A 1.1	Bool	Reset indicator light
P3	A 1.3	Bool	Indicator light material 1: 0=bk 1=rd 1=si
Part_AV	E 0.0	Bool	Workpiece available
B2	E 0.1	Bool	not black workpiece
B4	E 0.2	Bool	Safety light barrier
B5	E 0.3	Bool	Workpiece height correct
1B1	E 0.4	Bool	Lifting cylinder raised
1B2	E 0.5	Bool	Lifting cylinder lowered
2B1	E 0.6	Bool	Ejecting cylinder retracted
IP-FI	E 0.7	Bool	Downstream station free
S1	E 1.0	bool	Start button
S2	E 1.1	Bool	Stop button (normally closed)
S3	E 1.2	Bool	Automatic-manual switch
S4	E 1.3	Bool	Reset button
Em-Stop	E 1.5	Bool	Emergency stop unlocked

Tableau 2:Table des entrées/sorties

3- Test du programme:

- 1) Pour charger le programme il faut aller sur le volet « PROGRAMMING », puis cliquer sur « S7_Programming » (voir Figure 3)

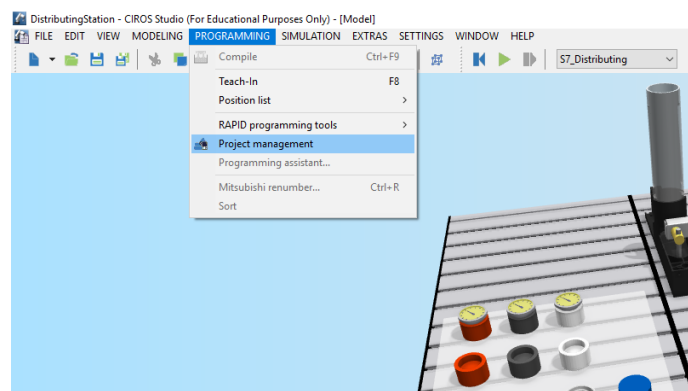


Figure 3 : Barre des menus sur CIROS

- 2) Un tableau de bord s'affichera dans lequel on peut lire « Controllers », en double cliquant dessus le programme par défaut qui commande la station (S7_Testing) apparait.

- 3) Pour charger le programme, clic droit sur « Program » puis « Load » (comme indiqué sur la Figure 4) et finalement sélectionner le fichier dans lequel est sauvegardé le programme (format.s7p)

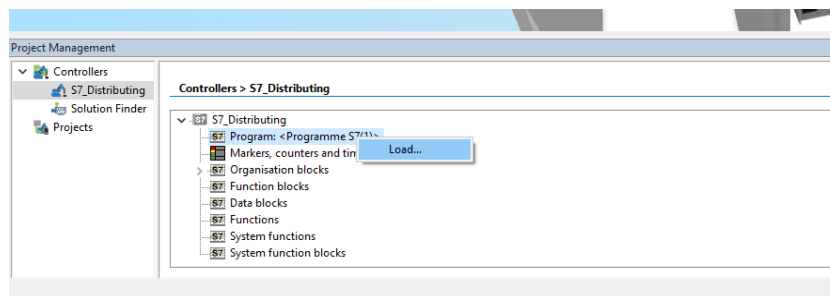


Figure 4 : Fenêtre des contrôleurs sur CIROS (API Virtuel)

- 4) Lancer la simulation, et visualiser le fonctionnement.

Remarque :

Cette méthode ne fonctionne qu’avec les programmes sous le format S7P, et donc on ne peut pas programmer avec TIA PORTAL, seule SIMATIC Step7 sauvegarde ses fichiers sous ce format.

Travail demandé :

En vous basant de la table des entrées/sortie ci-dessus (Tableau 1), écrire sur SIMATIC Step7 le programme qui permet de reproduire le fonctionnement de référence de la station de contrôle et le tester sur CIROS.

TP 3 : Communication entre station distribution et station test.

1-Principe de communication :

Dans l'installation MPS standard, une station communique normalement avec la station en amont et la station en aval. Si deux stations sont utilisées à une position de travail, comme par exemple les stations de distribution et de contrôle pour l'entrée des marchandises, un échange d'informations a alors lieu entre ces deux stations. Toutes les stations de l'installation communiquent par le couplage d'entrées et de sorties d'API. Ce type de communication est appelé couplage des E/S (Figure 1).

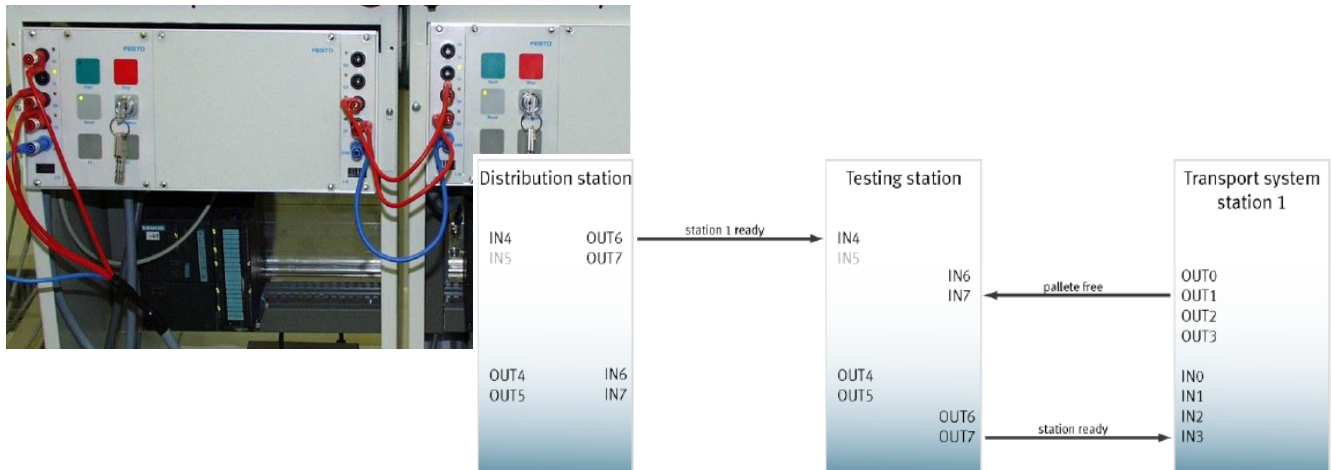


Figure 1 : Exemple de couplage E/S de l'atelier "Entrée marchandise"

Remarques :

- Sur CIROS ce couplage est configuré automatiquement et n'est pas visible dans la simulation.
- Les autres couplages des autres stations sont disponibles sur la documentation de CIROS.
- On peut considérer ce couplage comme étant un moyen d'échanger des informations en background.

Un autre moyen de communication est présent, il est plus apparent et plus évident que le couplage E/S. Ce type de couplage est appelé StationLink.

StationLink utilise des barrières opto-électroniques unilatérales comme émetteurs et récepteurs. L'émetteur de StationLink est monté du côté entrée des marchandises de la station, le récepteur de StationLink du côté de la sortie de marchandises. Par l'activation ou la désactivation de l'émetteur de StationLink, la station signale à la station en amont si elle est prête à recevoir une pièce à usiner ou si elle est occupée. La communication permet ainsi d'assurer un transfert sûr entre les stations. Les capteurs servant à la concaténation de plusieurs stations doivent se trouver les uns en face des autres et coïncider. A cet effet, les stations disposent donc de points d'amarrage (Figure 2).

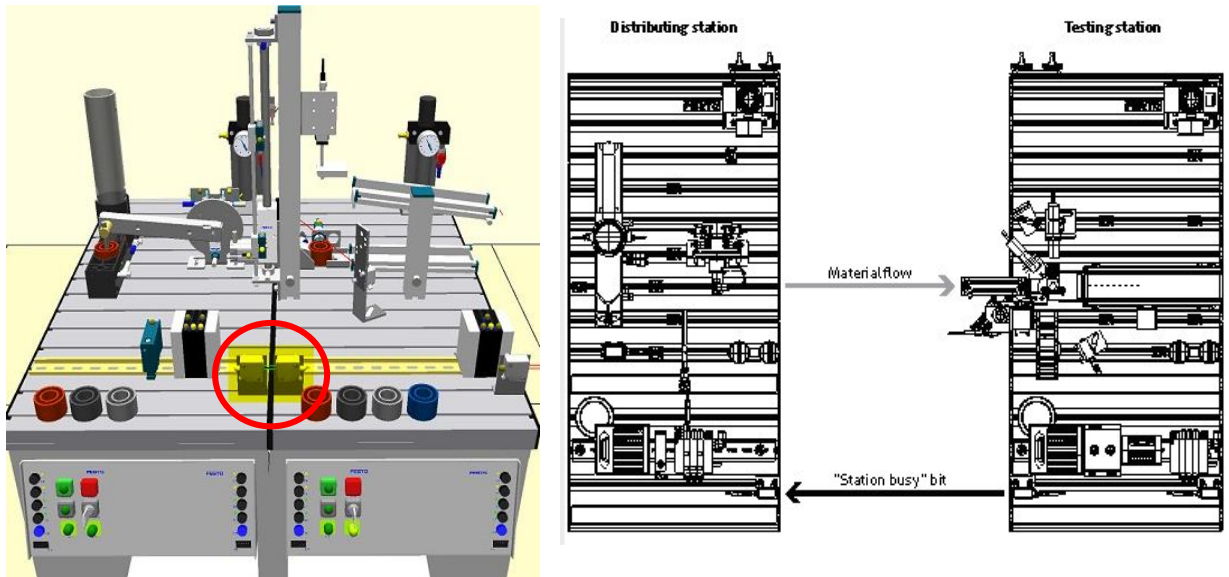


Figure 2 : La communication 1 bit entre deux stations d'après l'exemple des stations de distribution et de contrôle

- Un bit est transmis de la station de contrôle à la station de distribution. Le bit indique si la station de contrôle est prête à recevoir une pièce à usiner ou si elle est occupée. Le flux de données a lieu dans un sens seulement, de la station de contrôle vers la station de distribution.
- Le flux de matériaux s'effectue dans le sens opposé, soit, de la station de distribution à la station de contrôle.

2- Branchement des deux stations sous CIROS :

Reliez deux stations sous CIROS en suivant les étapes ci-dessous :

- 1) Lancer CIROS.
- 2) Créer un nouveau modèle, aller sur « **File** », « **New** » puis « **MPS system** » (voir Figure 3).

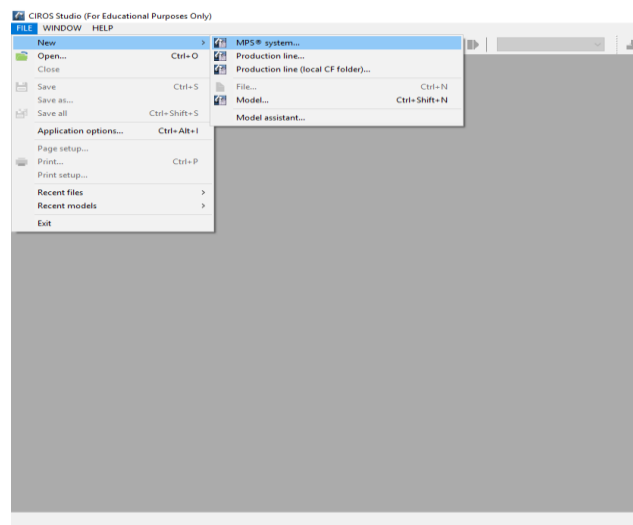


Figure 3 : barre des menus CIROS

- 3) Dans Model Libraries cliquer sur « **Distributing – Adjusted for Testing** » puis sur « **Add** » (voir Figure 4).

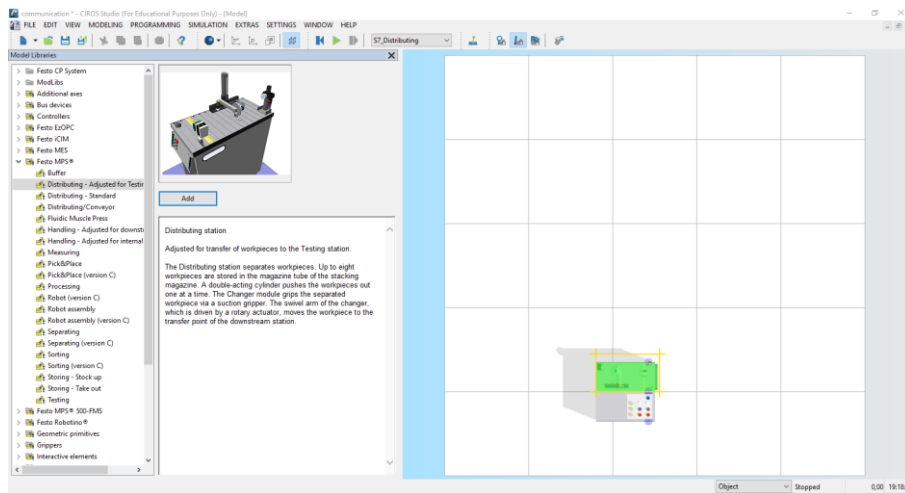


Figure 4 : Model libraries CIROS (distributing).

- 4) Faire la même opération pour la station Testing, Déplacer cette dernière jusqu'à ce qu'elle soit couplée avec la station distribution (les deux cercles bleus doivent coïncider voir Figure 5).

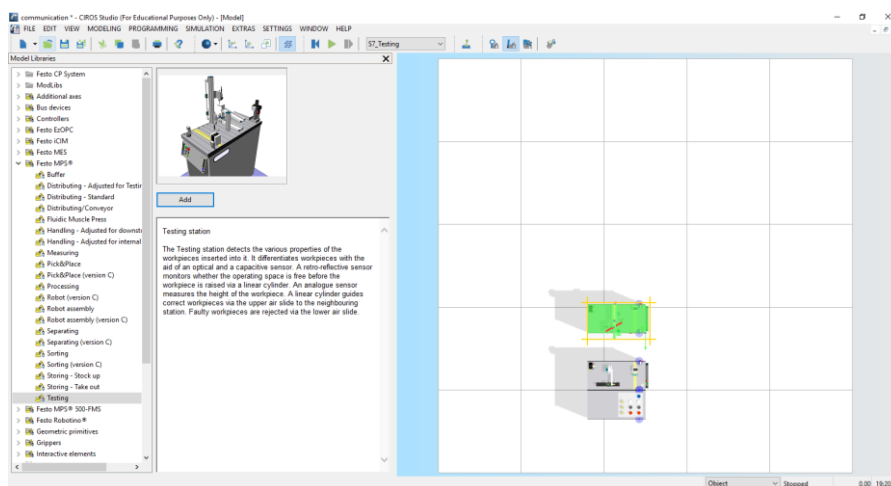


Figure 5 : Model libraries (Testing).

Travail demandé :

Appliquer les changements nécessaires aux programmes réalisés dans les TPs précédents (distribution et contrôle) afin que celles-ci communiquent entre elles puis tester votre programme sur CIROS.