



**Ecole National polytechnique**  
**Département d'électrotechnique**

**SIEMENS**

**SIEMENS**

**Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en électrotechnique**

---

# **Migration vers une technologie Simotion**

---

Présenté et soutenu publiquement le 22 juin 2023 par

**Djouadi Mohamed El Mokhtar**

Membres du jury :

Encadreur	<b>M. Fateh ZEGHNOUN</b>	Formateur chez SIEMENS SPA
Co-encadreur	<b>Pr. Kamel BOUGHRARA</b>	Professeur à l'ENP
Président	<b>Pr. Abdelhafid HELLAL</b>	Professeur à l'ENP
Examineur	<b>Pr. Redouane TAHMI</b>	Professeur à l'ENP





**Ecole National polytechnique**  
**Département d'électrotechnique**

**SIEMENS**

**SIEMENS**

**Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en électrotechnique**

---

**Migration vers une technologie Simotion**

---

Présenté et soutenu publiquement le 22 juin 2023 par

**Djouadi Mohamed El Mokhtar**

Membres du jury :

Encadreur	<b>M. Fateh ZEGHNOUN</b>	Formateur chez SIEMENS SPA
Co-encadreur	<b>Pr. Kamel BOUGHRARA</b>	Professeur à l'ENP
Président	<b>Pr. Abdelhafid HELLAL</b>	Professeur à l'ENP
Examineur	<b>Pr. Redouane TAHMI</b>	Professeur à l'ENP

# Remerciement

---

D'abord et avant tout, الحمد لله, je remercie mon Dieu, Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir aidé à mener à terme ce travail. Mes réussites ne sont pas dues à une intelligence ou à une expérience, mais plutôt grâce à mon Dieu qui m'a aidé,

الحمد والشكر لله

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon promoteur au sein de l'entreprise : Siemens SPA ; M Fateh Zeghnoun pour son accompagnement tout au long de la période de mon stage, et tous les efforts fournis de sa part. Mes chaleureux remerciements vont aussi à Mon Copromoteur au département d'Electrotechnique : M Kamel Boughrara, pour sa disponibilité, son écoute et ses conseils, qui m'ont été précieux.

Nous souhaitons également profiter de cette occasion mémorable pour exprimer nos sincères remerciements aux honorables membres du jury qui ont accepté avec honneur d'évaluer notre réussite en cette étape finale de nos études.

En ce jour qui marque la culmination de notre parcours universitaire, nous ressentons le devoir de témoigner fièrement notre reconnaissance et notre gratitude envers l'ensemble de nos enseignants, dont la contribution incessante rehausse le prestige de notre École Nationale Polytechnique. Les professeurs de notre département d'Electrotechnique ont non seulement partagé leur savoir et leur expérience avec nous, mais ils nous ont surtout accompagnés avec sagesse et dévouement.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers la société Siemens SPA qui m'a offert l'opportunité de réaliser un stage au sein de son siège. Grâce à cette expérience, j'ai eu la chance de travailler avec des équipements de grande valeur. Je souhaite remercier l'ensemble du personnel, en particulier M. Samir Benalia, et M. Sofian Galou pour leur soutien précieux et leurs conseils avisés.

Je remercie également les employés de la bibliothèque qui m'ont beaucoup aidé au cours de ces cinq années.

Nous exprimons enfin nos remerciements à l'encadrement technique et administratif de notre école pour leur bienveillance ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont de près ou de loin, soutenu et aidé durant ces derniers mois.

# Dédicaces

---

En signe d'amour et de respect je dédie ce modeste  
travail :

**A mes très chers parents**, à qui je dois ce que je  
suis

A mes sœurs

À toute ma Famille

À tous mes Amis

Merci

**ملخص:** لقد أصبحت الصناعات التحويلية في وقتنا تتطلب تطبيقات ديناميكية ذات دقة حركة عالية. SIMOTION هي عبارة عن منصة تحكم في الحركة مطورة من طرف شركة Siemens و يتم استخدامها للتحكم في الآلات الصناعية المعقدة، مثل الروبوتات و المطابع و آلات صناعة الأدوات و أنظمة النقل. توفر SIMOTION مرونة كبيرة وأداءً عاليًا بفضل قدرتها على دمج أنواع مختلفة من التقنيات مثل التحكم الرقمي والروبوتيك والايوتوماتيك. تستخدم هذه المنصة في مختلف القطاعات الصناعية مثل قطاع السيارات والطيران وتوليد الطاقة والصناعات التحويلية بشكل عام.

في هذا المشروع نرغب في تحويل الأنظمة التي تتحكم فيها PLC إلى تقنية Simotion. ولذلك، سنركز على مصنع دانون الذي يستخدم حاليًا نظام ملء علب الزبادي الذي يتم التحكم فيه بواسطة PLC S7-400. الهدف هو استبدال النظام التحكم الحالي، بما في ذلك S7-400 ب Simotion D. ولتحقيق هذه الانتقال، سنستخدم حزمة تدريب تسمح لنا بمحاكاة عمليات ملء علب الياغورت.

**الكلمات المفتاحية:** سيموشن، التحكم الحركي، مغيرات السرعة، التزامن الحركي، البرمجة بلغة MCC CONT، آلية ملء العلب.

**Abstract:** In recent times, manufacturing industries have been in need of highly precise and dynamic motion control applications. SIMOTION is a motion control and automation platform developed by Siemens. It enables the control of complex industrial machines, such as robots, presses, machine tools, and conveyor systems. SIMOTION offers great flexibility and high performance by integrating various technologies such as numerical control, robotics, and automation. This platform is used in diverse industrial sectors including automotive, aerospace, energy production, and general manufacturing industries.

In this project, our goal is to migrate systems controlled by programmable logic controllers to SIMOTION technology. We will focus on a Danone factory that currently utilizes an automated system for yogurt box filling, controlled by the S7 400 PLC. The objective is to replace the existing control system, including the S7 400, with Simotion D. To accomplish this transition, we will employ a training kit that allows us to simulate yogurt dosing operations.

**Keywords:** Simotion, motion control, drives, Synchronization, Programmation MCC CONT, filing process

**Résumé :** Ces derniers temps, les industries de fabrication nécessitent des applications dynamiques de grande précision du mouvement. SIMOTION est une plateforme de contrôle et d'automatisation de mouvement développée par Siemens. Elle permet de contrôler des machines industrielles complexes, telles que des robots, des presses, des machines-outils ou encore des systèmes de convoyage. SIMOTION offre une grande flexibilité et une haute performance grâce à sa capacité à intégrer différents types de technologies telles que la commande numérique, la robotique et l'automatisation. Cette plateforme est utilisée dans divers secteurs industriels tels que l'automobile, l'aérospatiale, la production d'énergie et les industries manufacturières en général.

Dans ce mémoire, on propose de migrer des systèmes contrôlés par les automates programmables vers la technologie Simotion. Pour cela, nous allons appliquer la technologie Simotion sur une usine de Danone qui utilise actuellement un système de remplissage de boîtes de yaourt contrôlé par l'automate S7 400. L'objectif est de remplacer le système de contrôle existant, y compris le S7 400, par Simotion D. Pour réaliser cette transition, nous utiliserons un banc d'essais qui nous permettra de simuler les opérations du dosage de yaourt.

**Mots clés :** Simotion, control de mouvement, variateurs de vitesse, Synchronisme, Programmation MCC CONT, processus de remplissage

# Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale .....	15
Chapitre 1 : Etat de l'art.....	16
Introduction.....	16
1.1 Présentation de l'entreprise Siemens SPA .....	17
1.2 Conditionnement.....	18
1.3 La machine EF 480 .....	18
1.3.1 Spécifications techniques .....	20
1.4 Les étapes du conditionnement .....	20
1.4.1 Déroulement plastique .....	20
1.4.2 Tirage .....	20
1.4.3 Chauffage .....	21
1.4.4 Décoration.....	21
1.4.5 Formage .....	21
1.4.6 Dosage.....	21
1.4.7 Passage du film opercule, marquage et soudage .....	22
1.4.8 Découpage et prédécoupage.....	23
1.4.9 Tirage en coupe déchets .....	23
1.4.10 Evacuation des pots remplis vers l'encaisseur .....	23
1.5 Processus à simuler .....	23
1.6 Les automates programmables industriels .....	24
1.6.1 Introduction.....	24
1.6.2 Structure interne d'un automate programmable industriel .....	24
1.6.3 Choix d'un API.....	24
1.6.4 Les variantes de la gamme SIMATIC.....	24
1.7 L'automate S7-400.....	25
1.7.1 Structure d'un S7-400 .....	25
1.7.2 Réseaux dans les automates Siemens.....	25
1.8 Variateurs de vitesse .....	26
1.8.2 Le contrôle du mouvement (Motion Control).....	28

1.8.3	Systèmes drives (Variateurs de vitesse).....	28
1.9	C'est quoi Simotion .....	29
1.9.1	Scout Software .....	30
1.9.2	Les plates formes matérielles .....	30
1.9.3	Architecture système.....	32
1.9.4	Système modulaire.....	32
1.9.5	Fonctionnalité de base.....	33
1.9.6	Objets technologiques .....	33
1.9.7	Packages technologiques.....	38
1.9.8	Bibliothèques de fonctions.....	38
1.10	Domaine d'applications .....	38
1.10.1	Exemple d'application, machine à scie volante .....	39
1.11	Langages de programmation.....	40
1.11.1	MCC (Motion Control Chart) programmation des séquences de déplacement .....	41
1.11.2	Programmation CONT/LOG (contacts/logigrammes).....	42
1.11.3	DCC (Drive Control Chart).....	43
1.11.4	Langage ST, (Structured Text).....	44
1.12	Structure du Kit de formation .....	44
1.13	Avantages de Simotion par rapport aux automates S7-300/400 dans le control de mouvement	45
Chapitre 2 : Plateforme matérielle de Simotion D.....		47
Introduction.....		47
2.1	Groupement d'axes dans un système Simotion D .....	48
2.1.1	Simotion D4x5 .....	48
2.1.2	Unité d'alimentation .....	48
2.1.3	Parties puissance .....	48
2.1.4	Drive-CLIQ.....	49
2.1.5	Les entrées/sorties .....	49
2.1.6	Alimentation .....	49
2.1.7	Slot pour options .....	49
2.1.8	Connection Ethernet.....	49
2.1.9	Connection Profibus.....	49
2.1.10	Slot pour la carte CF .....	49
2.1.11	Emplacement BOP.....	49
2.1.12	Sélecteur de mode de fonctionnement .....	49
2.2	Structure de Simotion D4x5.....	50



2.3	Différentes versions de Simotion D4x5 .....	51
2.3.1	Système multiaxes.....	51
2.3.2	Système mono axe .....	51
2.4	Connexion via DRIVE-CLIQ .....	52
2.5	Modules D'alimentation .....	53
2.6	Modules de puissance .....	53
2.7	Capteurs .....	54
2.7.1	Encodeurs.....	54
2.7.2	Sensor-Modules .....	55
Chapitre 3 : Commande des moteurs synchrones .....		56
Introduction.....		56
3.1	Domaines d'applications.....	57
3.2	MODELE DE REFERENCE.....	57
3.3	Equations électriques : .....	58
3.4	Equations mécaniques :.....	59
3.5	Transformation de Park.....	59
3.6	Commande Vectorielle .....	63
3.7	Simulation Matlab.....	65
3.7.1	Simulation : Machine synchrone a aimant permanant : .....	65
Chapitre 4 : Validation expérimentale .....		70
Introduction.....		70
4.1	Création du projet et configuration du matériel .....	71
4.2	Configuration d'entraînement dans Sinamics .....	71
4.3	Pilotage par le tableau de commande.....	72
4.4	Mesure des paramètres du moteur .....	72
4.5	Optimisation des régulateurs.....	73
4.5.1	Régulateurs de Sinamics .....	73
4.5.2	Configuration des axes.....	77
4.5.3	Régulateur de position de Simotion D .....	77
4.6	Référencement des axes .....	79
4.6.1	Référencement d'un axe possédant un codeur incrémental .....	79
4.6.2	Référencement d'un axe possédant un codeur absolu.....	80
4.7	Système exécutif : .....	80
4.8	Présentation des taches de notre projet .....	82
Conclusion générale.....		93

Bibliographie.....	94
Annexe .....	95

# Liste des figures

Figure 1:siemens SPA d'Alger.....	17
Figure 2:EF 480 de l'usine Danone.....	19
Figure 3:Composantes de la EF 480.....	19
Figure 4:cycle de formage.....	21
Figure 5:Machine de dosage.....	22
Figure 6: cycle de dosage souhaité.....	23
Figure 7: System automatise par S7-300/400.....	26
Figure 8: schema simplifie d'un variateur de fréquence.....	27
Figure 9:Taches du système de contrôle de mouvement.....	28
Figure 10: Simotion D425-2.....	29
Figure 11: Fonctions du Simotion.....	30
Figure 12:Simotion C230.....	31
Figure 13:Simotion P350.....	31
Figure 14 : Simotion D425.....	31
Figure 15: Exemple d'un système modulaire.....	33
Figure 16: Interfaces possibles avec les objets technologiques.....	34
Figure 17: synchronisme par réducteur.....	35
Figure 18:Exemple d'une synchronisation par réducteur en fonction du temps.....	35
Figure 19: Synchronisme de vitesse.....	36
Figure 20: synchronisme selon le profil de came.....	36
Figure 21: CAM édit.....	37
Figure 22 :CAM tool.....	37
Figure 23:Presses à imprimer.....	39
Figure 24 :Machine textile.....	39
Figure 25:Machines d'emballage.....	39
Figure 26 :Machine de production de verre.....	39
Figure 27:Machine à scie volante.....	40
Figure 28: Calcule du mouvement de l'axe esclave.....	40
Figure 29 : Exemple d'un programme MCC.....	41
Figure 30: Représentation d'un réseau CONT.....	42
Figure 31:Représentation d'un réseau LOG.....	42
Figure 32: Exemple d'un programme DCC.....	43
Figure 33: :Exemple d'un programme ST.....	44
Figure 34: Kit de formation Simotion D-435.....	45
Figure 35 :structure du kit de formation.....	45
Figure 36:Groupement d'axes dans un système Simotion D.....	48
Figure 37 : Schéma de raccordement de SIMOTION D4x5.....	50
Figure 38 : Câblage des composants via DRIVE-CLIQ.....	52
Figure 39 : Module de moteur et module de ligne.....	54
Figure 40:disques de codages d'encodeur incrémentale et absolu.....	55
Figure 41 : Représentation schématique d'une machine synchrone a aimant permanent.....	58
Figure 42 : Schéma d'une commande vectorielle d'un moteur synchrone à aimants permanents.....	65

Figure 43: Schéma Simulink, model d'un moteur synchrone a aimant permanent .....	66
Figure 44 :Schema simulink d'une commande vectoriel .....	66
Figure 45 :sous-systeme,onduleur .....	67
Figure 46:Resultats de simulation de la commande vectoriel.....	68
Figure 47:tension de l'onduleur résultante après la comparaison entre Vref et Vporteuse.....	69
Figure 48: L'outil 'NetPro' .....	71
Figure 49 :Configuration d'entrainement .....	72
Figure 50 : Mesure des paramètres du moteur .....	73
Figure 51: régulateur de courant .....	74
Figure 52: régulateur de vitesse .....	74
Figure 53: réglage automatique du régulateur.....	75
Figure 54: réponse à une consigne de vitesse de 600tr/min tel que: $K_p=0.012$ ; $T_i=10ms$ .....	75
Figure 55:réponse à une consigne de vitesse de 600tr/min tel que: $K_p=0.012$ ; $T_i=1000ms$ .....	75
Figure 56:réponse à une consigne de vitesse de 600tr/min tel que: $K_p=0.1$ ; $T_i=1000ms$ .....	76
Figure 57: tension de phase et courant de phase lors d'un saut de consigne (vitesse=500tr/min).....	76
Figure 58:fast fourrier transform (FFT) de la tension de phase.....	76
Figure 59: Courant direct (en bleu) et courant quadratique (en vert) .....	77
Figure 60:trace du positionnement avant l'optimisation .....	78
Figure 61: trace du positionnement après l'optimisation .....	78
Figure 62: test de circularité .....	78
Figure 63: referencement d'axe portant un codeur incrémentale.....	79
Figure 64: Programme MCC, mise à zéro des axes.....	80
Figure 65: Systeme exécutif.....	81
Figure 66: Cycle de dosage souhaité.....	82
Figure 67:boite de commissionnement .....	83
Figure 68:les entrées et les sorties de la boite de commissionnement .....	83
Figure 69: programme principale .....	85
Figure 70: Automode.Piton_coprs .....	85
Figure 71:Automode.Convoyeur.....	86
Figure 72:Automode.Moteur_doseur.....	87
Figure 73:fault_react.....	87
Figure 74:homming.referencement.....	88
Figure 75:Manualmode.Jog_Moteur_Doseur.....	89
Figure 76:Manualmode.Jog_Convoyeur .....	90
Figure 77:cycle de dosage souhaité .....	91
Figure 78:position réel et de consigne du moteur doseur .....	91
Figure 79:position du piston du corps .....	91
Figure 80:vitesse réel et de consigne du convoyeur.....	92
Figure 81: cycle des membranes des buses.....	92
Figure 82:cycle des membranes des corps .....	92

# Liste des tableaux

Tableau 1:Nomenclature de la machines EF 480[1] .....	20
Tableau 2 :Spécifications techniques[1] .....	20
Tableau 3:Composantes du doseur .....	22
Tableau 4: Les versions de Simotion D4x5.....	51
Tableau 5: Modules d'alimentations .....	53
Tableau 6:Repartition des taches .....	84

# Liste des abréviations

**AA** Sortie Analogique

**AC** Alternative Current

**AE** entrée analogique

**AI** Analog Input

**AO** Analog Output

**API** Automate Programmable Industriel

**Carte CF** Carte Compacte Flash

**CHAR** Caractère

**CONT** Schéma à Contact

**CONT/LOG** Schéma à Contact/ Schéma à logigramme

**CP** Communication Processor

**CPU** Central Processing Unit DA Sortie Digitale

**CU** Control Unit

**DB** Data Bloc

**DCC** Drive Control Chart program

**DC** Direct Current (courant continu)

**DE** Entrée digitale

**DI** Digital Input

**DO** Digital Output

**DP** Decentralized Periphery

**DRIVE-CLiQ** Drive Component Link with iQ

**E/S** Entrée/Sortie

**FB** Fonctionnel Bloc

**FC** Fonction

**FM** Function Module

**HW Config** HardWare Configuration

**IHM** Interface Homme-Machine

**HMI** Human-Machine Interface

**IM** Coupleurs d'extension

**INT** INTeger

**LED** Light Emitting Diode

**LIST** Langage de Liste d'instructions

**LOG** LOGigramme

**MC** Motion Control

**MCC** Motion Control Chart program

**MPI** Multi-Point Interface

**OB** Organisationnel Bloc

**OP** Operator Pupiter

**PC** Personnel Computer

**PCMCIA** Personal Computer Memory Card International Association

**PG** Programming Terminal

**PLC** Programmable Logic Controller

**PROFIBUS** Process Field Bus

**PROFINET** Process Field Net

**PROM** Programmable Read Only Memory

**EEPROM** Electrically Ersable Programmable Read Only Memory

**PS** Gamme des alimentations stabilisees de Siemens

**PWM** Pulse Width Modulation (Modulation à Largeur d'impulsion)

**RAM** Random Access Memory

**ROM** Read Only Memory

**SFB** System Fonctionnel Bloc

**SFC** System Fonction

**SIMATIC** Siemens Automatic

**SM** Signal Module

**S7** Step 7

**St** Structured Text

**TB** Terminal Board

**TCP/IP** Transmission Control Protocol/Internet Protocol

**Tia Portal** Totally Integrated Automation Portal

**TM** Terminal Module

**TOR** Tout Ou Rien



# Introduction générale

---

Ce travail consiste à exploiter les avantages de la technologie Simotion par rapport aux automates programmables dans le contrôle du mouvement des axes entraînés par des moteurs électriques, hydrauliques ou pneumatiques. Bien que toutes ses fonctionnalités et sa programmation ne puissent pas être décrites dans un simple rapport, nous en avons donné quelques exemples importants.

Malgré le fait qu'il existe de nombreuses industries qui utilisent des automates industriels pour la commande des variateurs de vitesse et le contrôle des processus, ils sont généralement utilisés dans des domaines où une grande précision de déplacement de multiples axes n'est pas nécessaire. Chaque axe est piloté indépendamment avec les automates, de plus, pour réaliser un simple déplacement il faut créer parfois de nombreuses fonctions.

C'est là que les avantages de Simotion deviennent apparents. Avec Simotion, la séparation entre les tâches des automates et celles des variateurs n'existe plus. Simotion est capable d'exécuter des fonctions logiques et contrôler le mouvement simultanément. De plus, il possède en plus des fonctions prédéfinies pour réaliser les tâches de déplacement, et peut contrôler un grand nombre d'axes.

Pour donner un sens à cette migration vers Simotion, nous avons pris une usine de production de yaourt (Danone) à titre d'exemple et nous avons refait son cycle de remplissage avec un banc d'essais.

Le premier chapitre est un état de l'art dans lequel nous avons expliqué le processus de conditionnement du yaourt. Ensuite, nous avons introduit les automates programmables de la gamme SIMATIC, puis nous avons défini Simotion et abordé quelques notions telles que les plateformes matérielles, les objets technologiques, les domaines d'application et les langages de programmation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué les composantes de la plateforme Simotion D avec laquelle nous avons travaillé.

Dans le troisième chapitre, nous avons expliqué la commande des machines synchrones à aimant avec lesquelles nous avons réalisé notre simulation.

Le dernier chapitre est une validation expérimentale dans laquelle nous avons expliqué comment travailler avec le logiciel Simotion Scout, comment configurer le matériel et optimiser les régulateurs. Nous avons également illustré les programmes que nous avons créés pour refaire le cycle de remplissage des boîtes de yaourt.

# Chapitre 1 : Etat de l'art

---

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous aborderons tout d'abord le processus d'emballage des yaourts et ses étapes dans l'usine de Danone que nous avons choisi comme exemple pour la migration vers Simotion. Nous nous concentrerons davantage sur l'étape de dosage, car c'est celle que nous simulerons à l'aide du kit Simotion. Ensuite, nous présenterons brièvement le fonctionnement des systèmes contrôlés par les automates programmables. Enfin, nous discuterons du matériel, du logiciel et des applications associées à Simotion.

## **1.1 Présentation de l'entreprise Siemens SPA**

Siemens SPA Algérie est une entreprise renommée opérant dans le secteur de l'ingénierie électrique et électronique. En tant que filiale de Siemens, une société multinationale allemande leader dans le domaine de la technologie, Siemens SPA d'Alger bénéficie d'une solide réputation et d'une expertise de classe mondiale (Figure 1).

L'entreprise est engagée dans la fourniture de solutions technologiques avancées dans divers domaines, tels que l'énergie, les infrastructures, l'industrie et les services publics. Elle propose des produits et des systèmes innovants, des solutions d'automatisation, des services d'ingénierie et de maintenance, ainsi que des équipements de pointe pour répondre aux besoins de ses clients.

Siemens SPA d'Alger s'efforce de contribuer au développement durable de l'Algérie en fournissant des solutions écoénergétiques et en soutenant les projets d'infrastructure essentiels pour le pays. L'entreprise met l'accent sur l'excellence opérationnelle, la qualité et la satisfaction client, en s'appuyant sur une équipe hautement qualifiée et engagée.

Avec son engagement envers l'innovation technologique, Siemens SPA d'Alger est un acteur clé dans la transformation numérique de l'industrie en Algérie. Elle vise à améliorer l'efficacité, la productivité et la durabilité des entreprises et des infrastructures, tout en favorisant la croissance économique et la création d'emplois.

Grâce à son réseau mondial, Siemens SPA d'Alger bénéficie du soutien et de l'expertise de Siemens, ce qui lui permet de proposer des solutions intégrées et personnalisées répondant aux besoins spécifiques du marché algérien.



Figure 1:siemens SPA d'Alger

## **1.2 Conditionnement**

Le conditionnement du yaourt est un processus essentiel dans l'industrie alimentaire qui vise à conserver la qualité et la fraîcheur de ce produit laitier populaire. Il s'agit de l'emballage du yaourt dans des contenants appropriés pour assurer sa sécurité, sa durée de conservation et sa présentation attrayante pour les consommateurs.

Le conditionnement du yaourt se déroule généralement en plusieurs étapes. Tout d'abord, le yaourt est préparé et mis en pot. Les pots utilisés peuvent être en verre, en plastique ou en carton, selon les préférences du fabricant et des consommateurs. Certains pots sont également équipés de couvercles hermétiques pour garantir l'étanchéité du produit.

Une fois le yaourt conditionné dans les pots, il est souvent étiqueté avec des informations essentielles telles que la marque, la saveur, la date de péremption et les valeurs nutritionnelles. Ces étiquettes aident les consommateurs à faire des choix éclairés lors de l'achat et de la consommation des yaourts.

Après l'étiquetage, les pots de yaourt sont généralement regroupés dans des emballages plus grands, tels que des boîtes ou des plateaux, pour faciliter leur transport et leur stockage. Ces emballages en gros sont souvent également marqués avec des informations supplémentaires sur le produit, comme la quantité totale de yaourt contenue à l'intérieur.

Le conditionnement du yaourt joue un rôle crucial dans la préservation de sa qualité. Les pots et les emballages doivent être hermétiques pour éviter toute contamination extérieure, telle que la croissance de bactéries indésirables. De plus, ces emballages protègent le yaourt de la lumière, de l'humidité et de l'oxygène, ce qui contribue à prolonger sa durée de conservation et à préserver sa fraîcheur[1].

## **1.3 La machine EF 480**

L'EF 480 est une machine de conditionnement avancée spécialement conçue pour le conditionnement des produits, notamment des yaourts. Elle est équipée de multiples fonctionnalités et modules pour effectuer diverses opérations de conditionnement de manière automatisée et efficace, et c'est la même machine utilisée dans l'usine Danone Djurdjura (figure 2). Cette machine est capable de manipuler les contenants, tels que les pots de yaourt, avec précision et rapidité. Elle peut remplir les pots avec la quantité appropriée de yaourt, sceller hermétiquement les couvercles, et étiqueter les produits avec les informations nécessaires.

L'EF 480 offre une flexibilité en termes de formats de conditionnement. Elle peut s'adapter à différentes tailles et formes de pots de yaourt, ainsi qu'à d'autres types de contenants, grâce à son système de réglage et de changement de format facilement ajustable.

En plus de ses fonctionnalités de base, cette machine peut également être équipée de systèmes avancés tels que des systèmes de contrôle de qualité, de traçabilité et de gestion des données. Ces fonctionnalités supplémentaires permettent de garantir la qualité du conditionnement, de suivre les produits tout au long du processus et de collecter des données pour l'analyse et l'optimisation de la production.

Grâce à son automatisation et à sa technologie de pointe, l'EF 480 contribue à améliorer l'efficacité et la productivité du processus de conditionnement des yaourts, tout en assurant la cohérence et la qualité des produits finis[1].



Figure 2:EF 480 de l'usine Danone

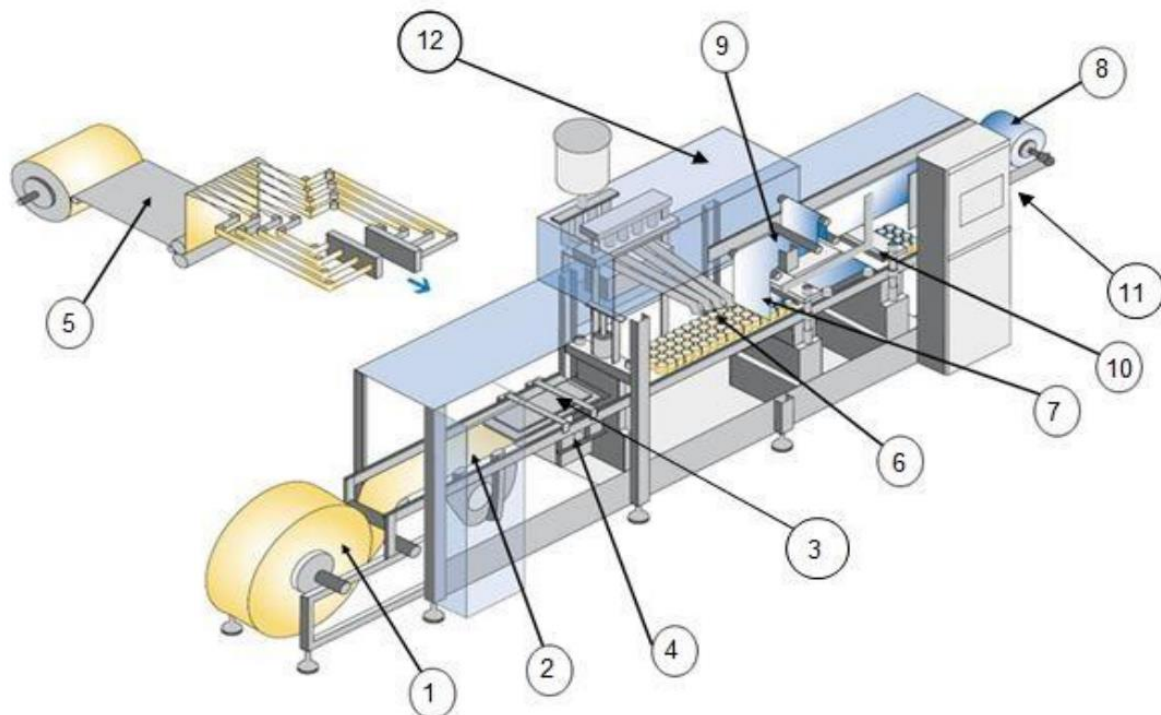


Figure 3:Composantes de la EF 480

1	Bobine dérouleur plastique
2	Chaine de tirage
3	Boite de chauffe
4	Presse de formage
5	Système de décoration
6	Doseur DPM
7	Presse de soudure
8	Bobine opercule
9	Système de datage
10	Presse de découpe
11	Tapis de sortie
12	Ensemble de flux laminaire

Tableau 1: Nomenclature de la machines EF 480[1]

### 1.3.1 Spécifications techniques de la machine EF480

Spécification de la machine	Type de machine	EF-480 S DECOR
	Année de construction	2003
	Numéro de modèle	40302
Alimentation électrique	Tension	380 V triphasé
	Fréquence	50 -60 Hz
	Puissance installé	80 kVA
	Intensité	115 A
Air comprimé	Pression	6-8 bar
	Débit	260 N.m <sup>3</sup> /h
Alimentation hydraulique (eau)	Débit	1,8 m <sup>3</sup> /h
	Pression	2 à 4 bar

Tableau 2 :Spécifications techniques[1]

## 1.4 Les étapes du conditionnement

### 1.4.1 Déroulement plastique

Le but de cette étape est de maintenir la bobine de bonde de plastique qui va être transformé par la suite en boite de yaourt.

### 1.4.2 Tirage

C'est le transport de la bande plastique vers les différents outils (boîte de chauffe, formage, soudure, découpe) par des chaînes équipées de pinces assurent la saisie et la traction de la bonde plastique.

### 1.4.3 Chauffage

Le chauffage est effectué afin de ramollir le plastique pour pouvoir effectuer le formage. Des vérins de commande sont utilisés pour actionner la boîte de chauffage, ce qui permet de la positionner correctement. La pression de contact exercée sur la bande plastique est déterminée par la compression des ressorts installés sur les plaques de chauffage supérieures.

### 1.4.4 Décoration

La découpe du film décoré se fait dans le sens de la longueur, créant ainsi des bandes correspondant à la largeur du pot. Ces bandes sont ensuite introduites à l'intérieur des moules de formage où elles sont enroulées puis découpées. Après le formage, elles se fixent dans les boîtes

### 1.4.5 Formage

Le but de cette étape est d'étirer le plastique chaud afin que le poinçon de formage, le plaque contre les parois du moule pour lui donner la forme des pots (figure ci-dessous).

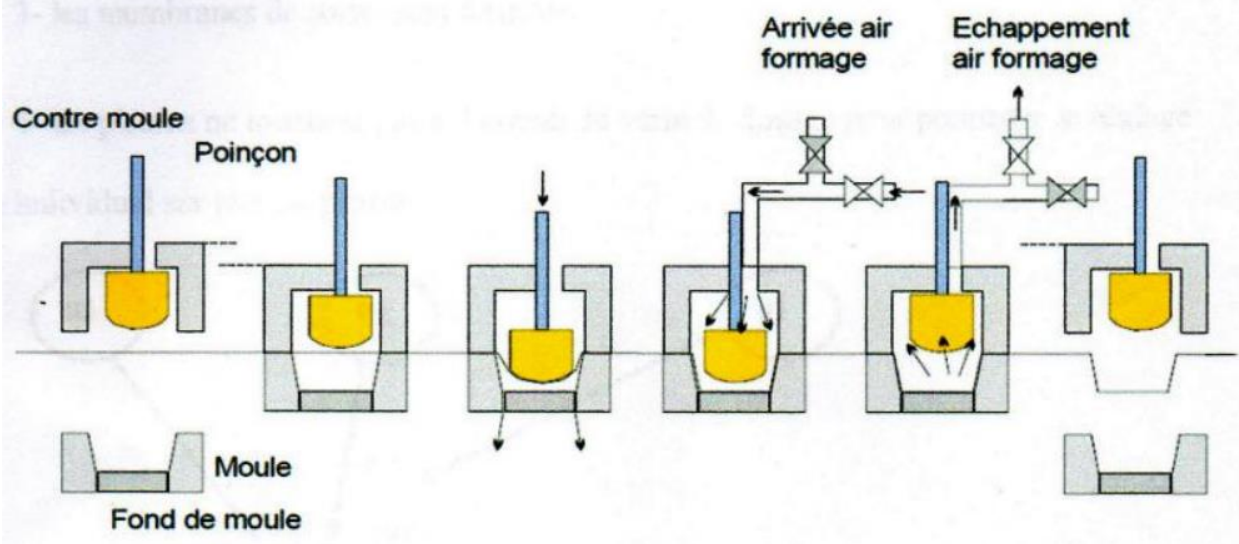


Figure 4: cycle de formage

### 1.4.6 Dosage

Le dosage est l'étape qui nous intéresse le plus parmi ces étapes du conditionnement, car c'est celle que nous avons simulée avec notre banc d'essais. Il s'agit de la mise du produit dans les boîtes, avec 5 éléments essentiels dans cette étape : la membrane du corps, la membrane de la buse, le piston du corps, le moteur doseur et le convoyeur (figure 5).

La membrane du corps est la membrane d'entrée, tandis que la membrane de la buse est la membrane de sortie. Elles s'ouvrent et se ferment en alternance. Lors de l'aspiration du produit à partir du réservoir les membranes des corps s'ouvrent, tandis que celles des buses se ferment. Ensuite, lors de l'éjection, elles basculent. Ce sont les pistons des corps qui aspirent le produit lorsqu'ils montent, puis le poussent lorsqu'ils descendent. Le moteur doseur est responsable du mouvement vertical des buses. Avant l'éjection du produit, les buses se trouvent en bas, près des

boîtes, puis elles montent progressivement au fur et à mesure de l'éjection. Enfin, il y a aussi le convoyeur qui déplace les boîtes.

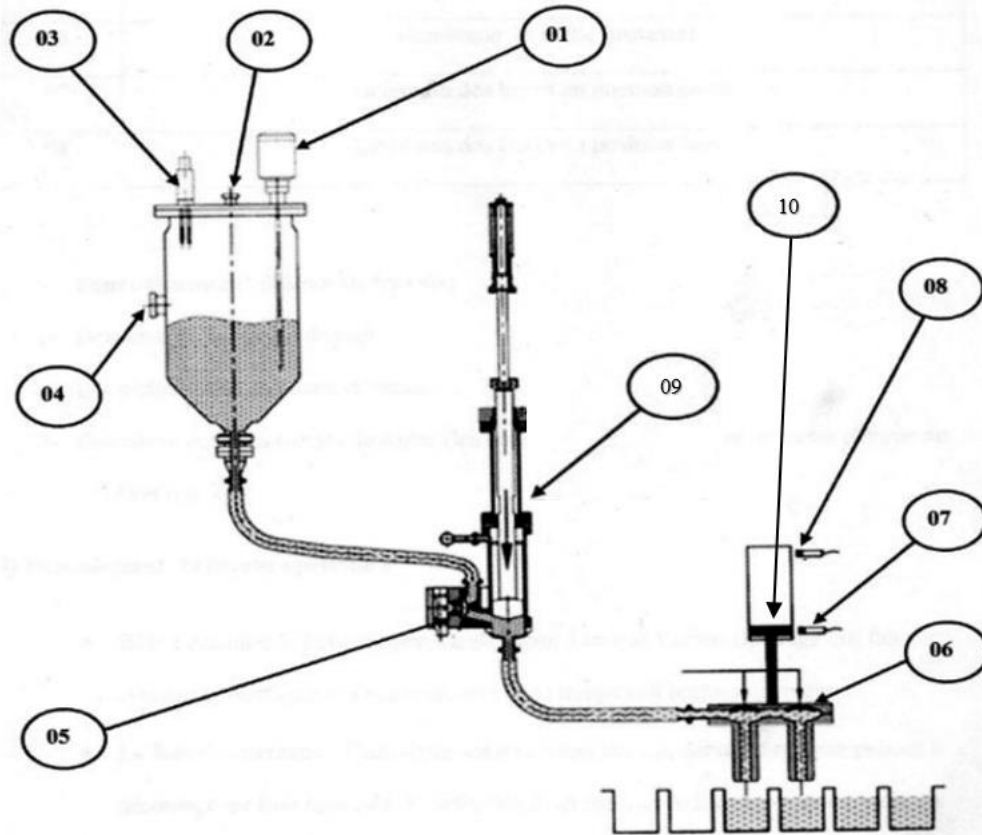


Figure 5:Machine de dosage

1	Sonde capacitive de niveau
2	Suppression air
3	Sonde de niveau max
4	Arrivée produit
5	Membrane du corps
6	Membrane du buse
7	Détection des buses en position basse
8	Détection des buses en position haute
9	Piston du corps
10	Moteur doseur

Tableau 3:Composantes du doseur

#### 1.4.7 Passage du film opercule, marquage et soudage

L'objectif est de dérouler la bobine opercule, puis marquer la date sur le film opercule, et enfin souder sur la bande plastique plate.



### 1.4.8 Découpage et prédécoupage

Tout d'abord, le prédécoupage est effectué pour créer des lignes de faiblesse sur le matériau des boîtes. Ensuite, lors du découpage, ces lignes de faiblesse sont utilisées pour séparer des groupes de 6 ou 8 boîtes les unes des autres.

### 1.4.9 Tirage en coupe déchets

L'objectif est appréhender les déchets, c'est-à-dire les parties non utilisées de la bandes plastique, et les ramener au bac à déchets des pots vides.

### 1.4.10 Evacuation des pots remplis vers l'encaisseur

Les cordes de transport, actionnées en continu par un moteur, assurent la rotation des pots le long de la ligne de production.

Les pots sont maintenus en position grâce à des guides, puis sont acheminés hors de la machine.

## 1.5 Processus à simuler

Le processus qu'on va simuler dans le chapitre 4 avec Simotion est le dosage, c'est-à-dire la sixième étape du conditionnement, nous allons nous concentrer sur le mouvement des pistons qui se trouvent dans les corps de remplissage et le mouvement verticale des buses qui est contrôlé par des 'moteurs doseurs', et le déplacement du convoyeur, ainsi que l'ouverture et la fermeture des membranes des buses et des corps.

Nous allons essayer d'avoir les cycles présentes dans la Figure 6:

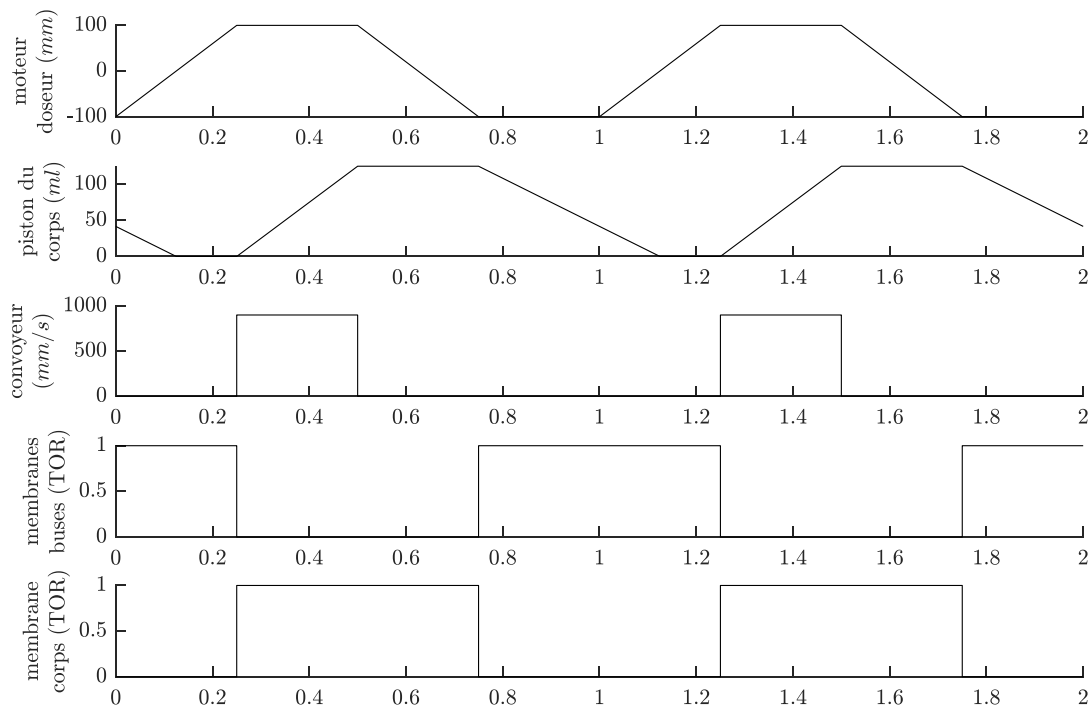


Figure 6: cycle de dosage souhaité

## **1.6 Les automates programmables industriels**

### **1.6.1 Introduction**

Un automate programmable industriel (API) est une machine électronique conçue pour être programmée, dans le but de contrôler en temps réel des processus industriels dans un environnement industriel. L'automate programmable est capable de s'adapter à un large éventail d'applications grâce à sa modularité, que ce soit en termes de traitement, de composants ou de langage.

### **1.6.2 Structure interne d'un automate programmable industriel**

Les automates programmables industriels (API) se composent principalement de quatre parties essentielles :

- Une unité de traitement, qui abrite un processeur (CPU).
- Une mémoire.
- Des modules d'entrées-sorties.
- Une alimentation électrique de 230 V, 50/60 Hz (AC) et 24 V (DC).

La structure interne d'un automate programmable industriel (API) est similaire à celle d'un système informatique simple. L'unité centrale regroupe le processeur et la mémoire centrale. Elle est responsable de l'interprétation et de l'exécution des instructions du programme.

Choix d'un API

### **1.6.3 Choix d'un API**

Le choix d'un automate programmable industriel (API) dépend de la partie commande qui doit être programmée. Il est crucial de prendre en compte plusieurs critères, notamment :

- Les langages de programmation disponibles.
- Le nombre de voies analogiques.
- La capacité de traitement arithmétique.
- La disponibilité d'une bibliothèque fonctionnelle.
- Le nombre d'entrées-sorties (E/S), en tenant compte des possibilités d'extension.
- La taille du programme.
- La vitesse de traitement.
- Les fonctions complémentaires telles que les temporisateurs et les compteurs.

Ces critères doivent être pris en considération lors du choix d'un API pour assurer une programmation adaptée à la commande spécifique [2].

### **1.6.4 Les variantes de la gamme SIMATIC**

Cette gamme se divise en trois familles distinctes :

1. La famille SIMATIC S7 : Elle fait référence à un produit développé par la société SIEMENS et englobe la nouvelle génération d'automates programmables.
2. La famille SIMATIC C7 : Le SIMATIC C7 est constitué de deux sections fonctionnant de manière autonome et capable de communiquer entre elles via l'interface MPI. Il comprend la CPU et le pupitre opérateur OP.

3. La famille SIMATIC M7 : Le SIMATIC M7 est un calculateur industriel compatible avec les PC. Il est construit selon une architecture modulaire, intégrée dans la technologie des automates SIMATIC S7. Il peut être incorporé dans un automate S7-3 [3].

## **1.7 L'automate S7-400**

Il s'agit d'une plateforme d'automatisation spécialement conçue pour répondre aux besoins de l'industrie manufacturière et du génie des procédés. Elle est particulièrement adaptée aux tâches impliquant le traitement de grandes quantités de données dans l'industrie des procédés. Cette plateforme offre des capacités de traitement rapide et des temps de réponse déterministes, ce qui en fait l'outil idéal pour coordonner des installations complètes et contrôler des appareils ou des stations subordonnées. Grâce à sa puissance de communication élevée et à ses interfaces intégrées, elle permet une connectivité optimale.

### **1.7.1 Structure d'un S7-400**

Le SIMATIC S7-400 est un système d'automatisation modulaire qui propose une gamme variée de modules, notamment :

- Des unités centrales (CPU) avec différentes capacités, comprenant des entrées/sorties intégrées (par exemple, CPU412-1) ou une interface PROFIBUS intégrée (par exemple, CPU412-2DP).
- Des modules d'alimentation PS (Power Supply) pour convertir les tensions alternatives ou continues en tension de 5V ou 24V.
- Des modules de signaux SM pour les entrées et sorties numériques et analogiques.
- Des modules de fonction FM qui assurent des fonctionnalités de positionnement, de régulation et de comptage.
- Des modules CP (port de communication) qui permettent de connecter une CPU à différents réseaux.

Le système SIMATIC S7-400 offre ainsi une modularité permettant de choisir et de combiner les modules nécessaires en fonction des besoins spécifiques d'automatisation.

### **1.7.2 Réseaux dans les automates Siemens**

Selon les exigences de la communication industrielle, différents réseaux sont disponibles, classés ci-dessous par ordre croissant de performance : le MPI, le PROFIBUS et l'Industriel Ethernet.

#### ***1.7.2.1 MPI (Multi Point Interface)***

Le réseau MPI (Multi Point Interface) est utilisé pour les connexions de petite envergure au niveau du terrain et de la cellule. Cependant, son utilisation est limitée aux automates SIMATIC S7 conçus spécifiquement pour servir d'interface de programmation. Lorsque les exigences de communication deviennent plus complexes, les limitations de la SIMATIC S7 peuvent rapidement devenir un obstacle quasi insurmontable[2].

#### ***1.7.2.2 PROFIBUS***

Le réseau PROFIBUS (Process Field Bus) est spécifiquement conçu pour les environnements industriels et les cellules modernes. En tant que système de communication ouvert (non propriétaire), le PROFIBUS est utilisé pour transmettre des volumes de données de petite à

moyenne taille entre un nombre limité de participants. Il représente un type de communication caractérisé par des échanges de données cycliques rapides.

### 1.7.2.3 Ethernet industriel

L'Ethernet industriel est un réseau conçu pour les niveaux de la cellule et de la supervision. Il facilite les échanges de grandes quantités de données sur de longues distances, et ce, entre un grand nombre de stations. Il représente le réseau le plus puissant pour la communication industrielle, offrant une configuration simple et une extensibilité aisée, la figure 7 illustre un exemple d'un réseaux connecté par Profinet [2].

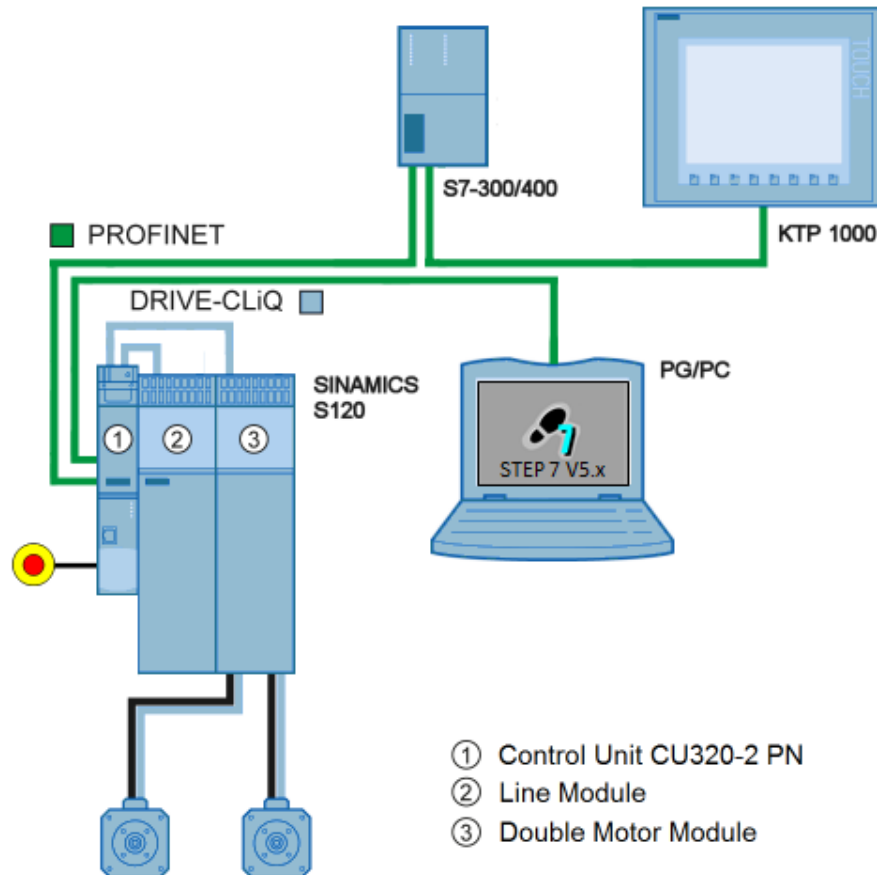


Figure 7: System automatisé par S7-300/400

## 1.8 Variateurs de vitesse

### 1.8.1.1 Entraînement

L'objectif du système d'entraînement est de contrôler un moteur afin d'atteindre une vitesse spécifique ou une position définie. Différents modules sont nécessaires pour cela, tels que l'alimentation, les unités de puissance, les moteurs, les codeurs et l'unité de commande.

Le système d'entraînement peut fonctionner de manière autonome, sans nécessiter un contrôleur de niveau supérieur. Cependant, s'il est utilisé comme contrôleur de niveau supérieur, les consignes de vitesse sont transmises aux différents entraînements. L'unité de commande utilise alors une

vitesse de référence intégrée et un régulateur de courant pour assurer que la vitesse réelle du moteur suive la consigne de vitesse transmise.

### 1.8.1.2 Convertisseur

Le convertisseur fournit une alimentation à courant triphasé variable à un moteur triphasé. Pour ce faire, le courant triphasé provenant de l'alimentation est redressé dans le convertisseur, puis régénéré en un courant triphasé à fréquence variable comme on peut le voir dans la figure 8.

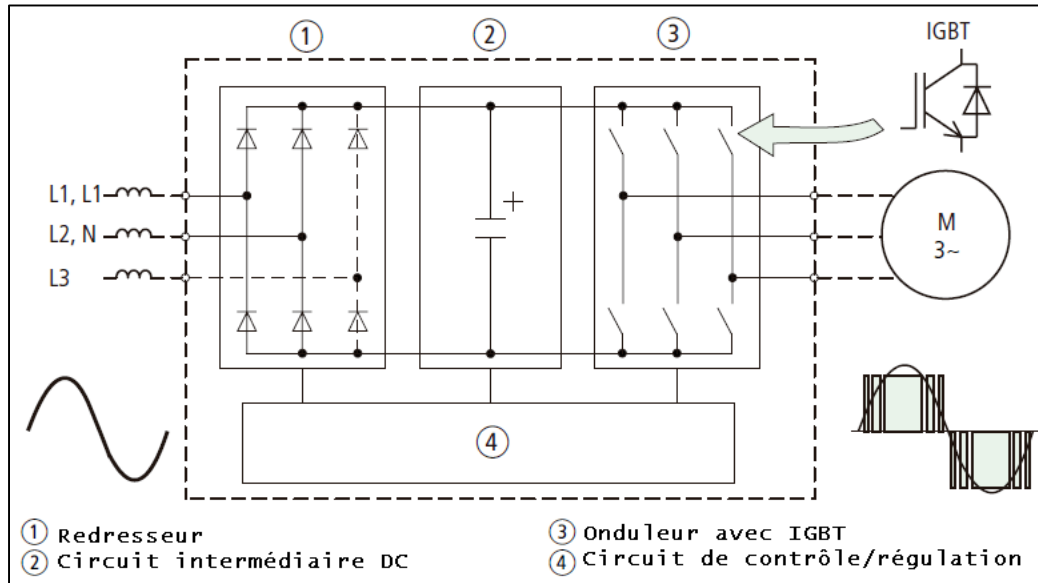


Figure 8: schéma simplifié d'un variateur de fréquence

### 1.8.1.3 Vitesse et Fréquences de sortie

Dans certaines situations, il peut être préférable de définir une fréquence spécifique plutôt qu'une consigne de vitesse. En se basant sur les caractéristiques du moteur telles que le courant nominal, la puissance nominale et la vitesse nominale, le convertisseur est en mesure de calculer la fréquence de sortie requise pour le moteur.

Le convertisseur génère en sortie une fréquence de 0 à 50 Hz en fonction de la consigne de vitesse à l'entrée. Il est également possible d'obtenir des fréquences plus élevées, en fonction du type de moteur utilisé.

### 1.8.1.4 Redresseur

Le courant triphasé provenant de l'alimentation est redressé dans un circuit redresseur. Le module de redressement, également connu sous le nom d'alimentation ou de Module de Ligne, est capable, selon la version, de fournir de l'énergie soit au circuit intermédiaire à courant continu (bus CC), soit de retourner l'énergie depuis le bus CC vers le réseau.

### 1.8.1.5 Onduleur

Une unité de puissance à transistors convertit cette tension continue en un courant triphasé à fréquence et tension variables. Ce module est également connu sous le nom de Module Moteur.

### 1.8.1.6 Bus CC

L'énergie de la tension continue de l'alimentation est stockée dans le circuit intermédiaire à courant continu (bus CC) à l'aide de condensateurs. Ces condensateurs, intégrés dans l'alimentation et les modules onduleur, servent à emmagasiner l'énergie.

### 1.8.1.7 Régulation en boucle fermée

Un module est requis pour la prise en compte des exigences de l'application et la commande et la régulation des autres modules, tant en boucle ouverte qu'en boucle fermée.

## 1.8.2 Le contrôle du mouvement (Motion Control)

Le contrôle du mouvement, également appelé Motion Control, comme le montre la figure 9, est une technologie qui permet de contrôler les mouvements précis de machines et de systèmes mécaniques. Cette technologie est utilisée pour assurer un fonctionnement précis et répétable de machines, de robots et de systèmes automatisés dans les environnements de production industrielle. Le contrôle de mouvement est réalisé à l'aide de différents types de systèmes de commande, tels que des contrôleurs de mouvement, des actionneurs, des capteurs de position, des encodeurs, des servomoteurs et des variateurs de fréquence. Ces dispositifs permettent de contrôler les mouvements des machines, notamment la vitesse, la direction, la position et l'accélération.

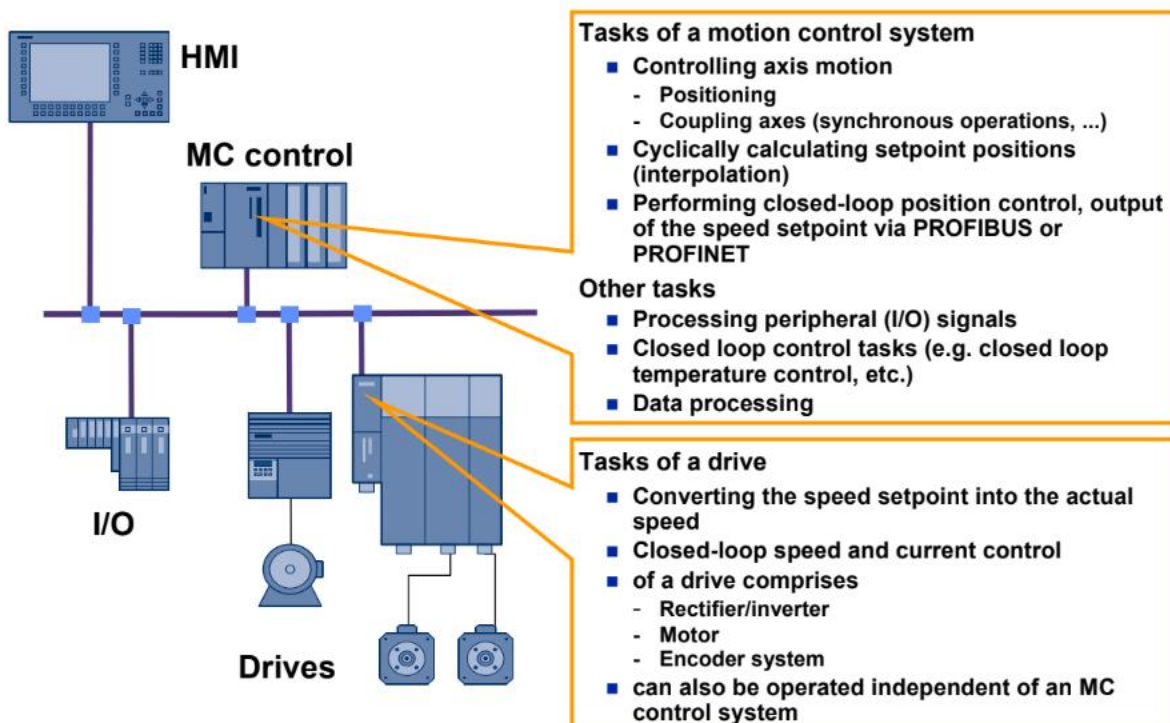


Figure 9: Tâches du système de contrôle de mouvement

### 1.8.3 Systèmes drives (Variateurs de vitesse)

La tâche du système d'entraînement est de convertir les consignes de vitesse reçues par la CPU (Simotion dans notre cas) en une vitesse réelle du moteur. Un régulateur de vitesse et de courant est intégré au variateur système à cette fin précise.

Le moteur contrôle l'axe spécifié jusqu'à la position cible souhaitée avec la vitesse de consigne spécifiée par le système de contrôle de mouvement. Le système d'entraînement se compose d'un convertisseur, d'un moteur et d'un codeur.

## 1.9 C'est quoi Simotion

SIMOTION est un système complet de contrôle de mouvement conçu pour les applications complexes (figure 10). Il intègre à la fois la fonction Motion Control et la facilité de commande dans une unité unique. En regroupant la gestion avancée des fonctions de mouvement, SIMOTION offre une solution évolutive pour le contrôle de mouvement. Il inclut l'outil d'ingénierie SCOUT, des packages technologiques Motion Control et un système d'exécution partagé compatible avec différentes plates-formes matérielles.

SIMOTION offre une plate-forme système optimisée spécialement conçue pour répondre aux besoins des applications Motion Control et des tâches technologiques en matière d'automatisation et d'entraînement. Cette solution est rendue possible grâce à un nouveau système de contrôle de mouvement universel. SIMOTION est un système de contrôle de mouvement intégré, principalement destiné à l'automatisation des machines de production. L'uniformité et l'intégration sont assurées à tous les niveaux, de l'ingénierie à la programmation, en passant par la communication, la gestion des données et l'interface homme-machine (IHM). Ainsi, tous les composants du système, y compris les différentes plates-formes matérielles, sont harmonieusement intégrés et interagissent de manière cohérente [4].



Figure 10: Simotion D425-2

L'approche innovante de SIMOTION consiste à supprimer la séparation traditionnelle entre les fonctions d'automatisation pures (typiquement des automates) et les fonctions de mouvement (motion control). Cette fusion de fonctionnalités est implémentée à la fois dans le matériel et le logiciel. Du point de vue matériel, cette nouvelle approche signifie que le contrôleur doit être capable de traiter des fonctions de mouvement. D'autre part, un système d'entraînement doit être capable d'effectuer des tâches d'automatisation. Côté logiciel, la fusion des fonctions d'automatisation et des fonctions de mouvement simplifie l'ingénierie (figure 11). Cela commence par la configuration et se poursuit par le paramétrage et la programmation. L'intégration avec

SIMATIC apporte des avantages supplémentaires car les deux systèmes sont souvent exploités dans une seule installation. Les deux systèmes peuvent être configurés et programmés sur une interface d'ingénierie standard [5].

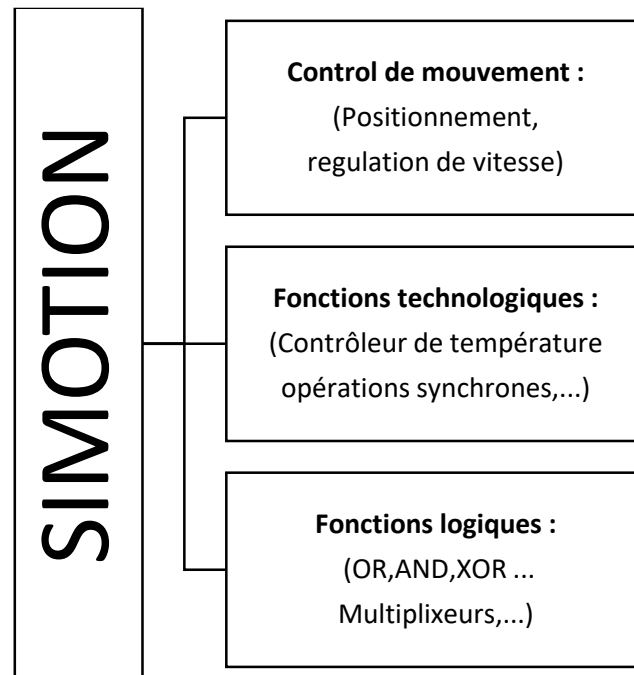


Figure 11: Fonctions du Simotion

### 1.9.1 Scout Software

Simotion Scout est une plateforme logicielle qui est utilisé pour la programmation, la configuration, le réglage et la surveillance des systèmes de contrôle de mouvement et d'automatisation industrielle. C'est le même logiciel pour toutes les plates-formes matérielles de Simotion.

Simotion Scout offre une interface utilisateur intuitive qui permet de programmer des mouvements précis et répétables pour les machines et les systèmes automatisés. Elle permet également de configurer les paramètres de contrôle de mouvement pour différents types d'applications, tels que la production de pièces de précision, l'assemblage de produits électroniques, la découpe et le formage de métaux, et bien d'autres encore.

En utilisant Simotion Scout, on peut surveiller en temps réel les performances des systèmes automatisés et détecter rapidement les problèmes de performance. Elle permet également de diagnostiquer les problèmes de manière précise et de résoudre rapidement les problèmes de performance des machines, ce qui contribue à minimiser les temps d'arrêt et à améliorer la productivité de l'entreprise.

### 1.9.2 Les plates formes matérielles

La logique intégrée au système SIMOTION permet le contrôle de mouvement (positionnement, synchrone, etc.) et contrôle de processus (pression, contrôle de température, etc.) dans le même système. SIMOTION fournit trois plates-formes matérielles :



- Plate-forme contrôleur : SIMOTION C
- Plate-forme d'entraînement : SIMOTION D
- Plate-forme pour PC : SIMOTION P

Un programme de commande peut s'exécuter sur l'une ou l'autre plate-forme d'entre eux.

En plus de la fonctionnalité de contrôle de mouvement, la fonctionnalité API typique peut également être intégrée dans le système MC. Comme pour un automate programmable, les signaux périphériques (Entrée/Sorties) numériques ou analogiques peuvent être lus, traités et les résultats sont à nouveau transmis aux périphériques [6].

---

### Simotion C

- Interfaces : 2 Profibus DP  
1 Ethernet
- Format matériel de Simatic S7 300
- Couplage d'entraînement :  
Analogique (4 canaux) ou via Profibus DP [7]



Figure 12: Simotion C230

---

### Simotion P

- Interfaces : 2 Profibus DP  
2 Ethernet, 4 USB
- Format matériel Boitier PC avec windows NT 4.0 ou XP
- Processeur : Intel pentium 1.2GHz/  
PentiumM760 2GHz
- Mémoire : Max 1Go RAM ,20 Go disk dur
- Couplage d'entraînement :  
Profibus DP / Profinet [7]



Figure 13: Simotion P320

---

### Simotion D

- Interfaces : 2 Profibus DP  
2 Ethernet, 4 USB
- Format matériel : Système d'entraînement  
SINAMICS
- Couplage d'entraînement : Trois réseaux  
maitres Profibus (un interne et deux externes)  
[7]



Figure 14 : Simotion D425

SIMOTION C permet :

- la liberté de choix des entraînements,
- une large gamme de signaux de processus,
- des mises à niveau par des interfaces analogiques intégrées,

SIMOTION P convient :

- aux applications qui exigent une ouverture sur le monde des PC,
- aux applications qui exigent la commande et la supervision sur une même plate-forme matérielle,
- à la gestion, à l'analyse et à la journalisation de gros volumes de données.

Dans le cas de SIMOTION D, la fonctionnalité SIMOTION est intégrée directement dans le module de régulation du système d'entraînement SINAMICS S120. L'ensemble du système composé de la commande et du variateur est ainsi très compact et particulièrement réactif [8].

### **1.9.3 Architecture système**

Le progrès le plus significatif du nouveau système d'automatisation réside dans l'architecture système. Celle-ci constitue la base des développements ultérieurs du système. L'architecture système de SIMOTION prend en charge des concepts particuliers tels que la décentralisation, différentes plates-formes cibles et l'intelligence répartie.

Le logiciel a été construit de manière modulaire et peut être adapté en souplesse aux exigences les plus diverses.

### **1.9.4 Système modulaire**

#### ***1.9.4.1 Définition***

Dans un système d'entraînement modulaire, plusieurs modules d'un même type peuvent être utilisés comme le montre la figure 15. Par exemple, plusieurs onduleurs (Modules Moteur) peuvent être connectés à un même bus CC.

#### ***1.9.4.2 Échange d'énergie***

L'échange d'énergie peut atténuer les contraintes sur l'unité d'alimentation/ récupération d'énergie ; même dans ce cas un redresseur à diodes peut être suffisant. L'efficacité via la connexion au bus CC est meilleure qu'avec l'échange d'énergie via le système d'alimentation. Dans ce dernier cas, l'unité de puissance d'une unité d'alimentation/ récupération d'énergie serait impliquée deux fois dans le processus.

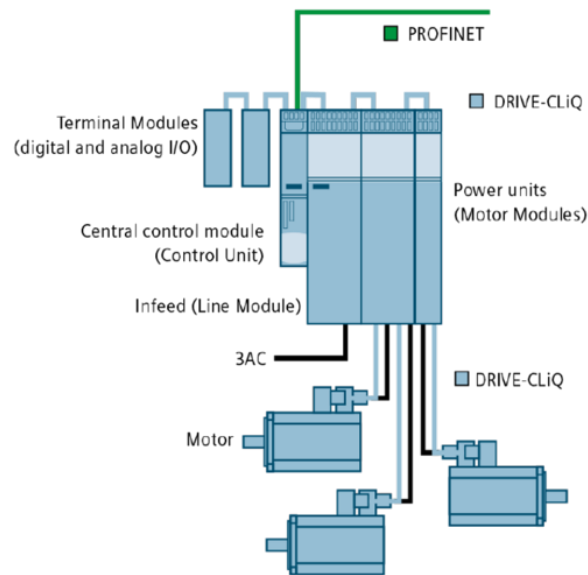


Figure 15: Exemple d'un système modulaire

### Avantages

- Echange d'énergie entre les modules (freinage/entraînement)
- Utilisation conjointe des composants du circuit intermédiaire (résistance freinage, module de capacité)
- Nécessite une seule connexion vers le réseau : coûts plus bas pour les modules et constituants côté réseau

### 1.9.5 Fonctionnalité de base

La fonctionnalité de base de l'appareil contient des fonctions conçues pour la commande et la régulation, ainsi que la logique et l'arithmétique.

L'exécution du programme peut être cyclique, à commande chronologique ou à commande par interruptions.

Le noyau SIMOTION contient par conséquent la fonctionnalité qui est nécessaire pour pratiquement toutes les applications, et correspond pour l'essentiel à un automate programmable avec la réserve de commandes conforme à CEI 1131-3, ainsi que des fonctions du système pour la commande de différents composants, par ex. des entrées et des sorties.

### 1.9.6 Objets technologiques

Les objets technologiques (figure 16) mettent à disposition des fonctions de technologie et de Motion Control, ils contiennent donc des fonctions du système, et masquent le raccordement matériel concret.

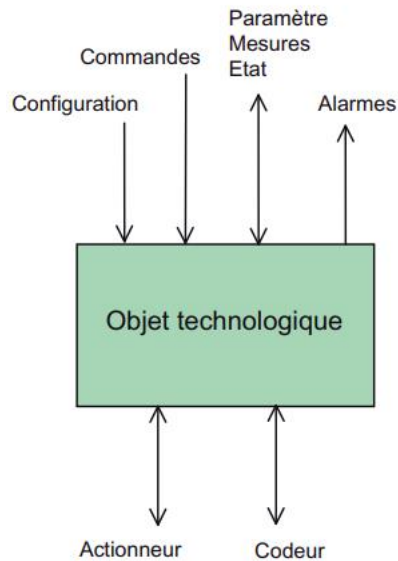


Figure 16: Interfaces possibles avec les objets technologiques

- Voici quelques exemples d'objets technologiques :

### 1.9.6.1 Synchronisme

Les fonctions synchrones prennent une importance croissante dans les techniques d'automatisation. Les progrès réalisés en matière de commande et de régulation et la disponibilité de systèmes de plus en plus performants conduisent au remplacement de plus en plus fréquent de solutions purement mécaniques par des variantes "électroniques". Les fonctions synchrones de la technologie SIMOTION offrent la possibilité de remplacer des couplages mécaniques rigides par des "automatismes" et d'accroître ainsi la flexibilité et la facilité de maintenance des solutions développées.

Un objet pilote (maître) génère une valeur pilote qui est traitée par l'objet synchrone selon des critères définis et qui est assignée ensuite à l'axe asservi (esclave) comme consigne.

### 1.9.6.2 Synchronisme par réducteur

Le synchronisme par réducteur permet d'obtenir une fonction de transfert linéaire de façon automatique entre une valeur pilote et un axe asservi comme indique par la figure 16, telle qu'elle pourrait par exemple être réalisée par un réducteur de façon mécanique. Le rapport de transmission peut être spécifié en tant que facteur de réduction permettant d'obtenir une représentation linéaire de la position de l'axe pilote sur la position de l'axe asservi.

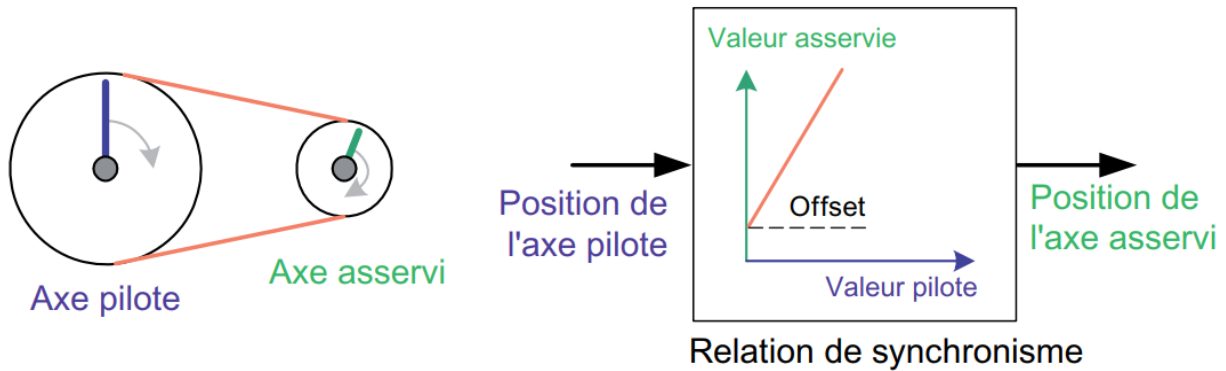


Figure 17: synchronisme par réducteur

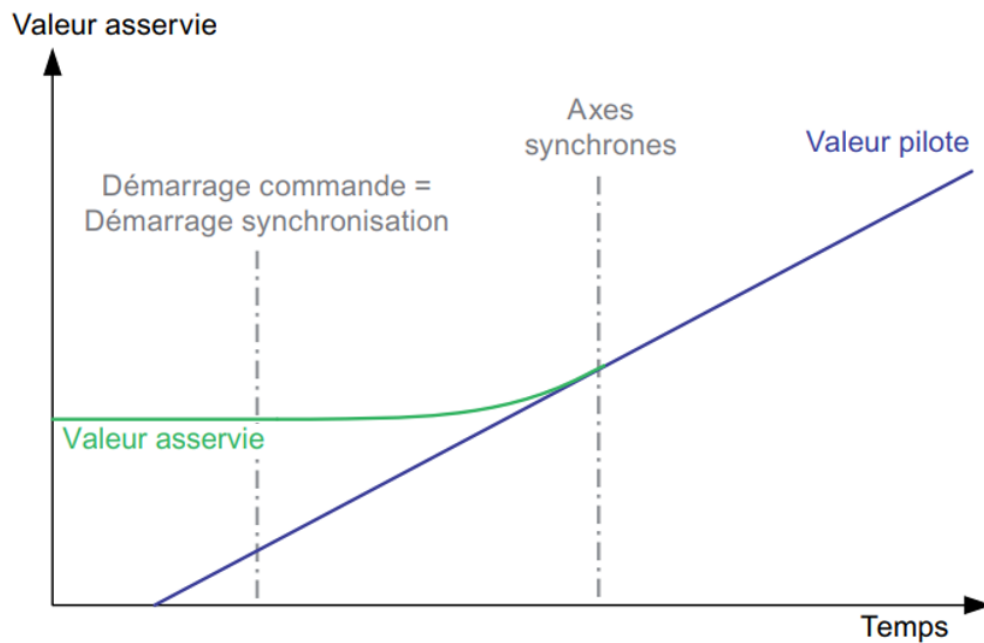


Figure 18: Exemple d'une synchronisation par réducteur en fonction du temps

### 1.9.6.3 Synchronisme de vitesse

Lors du synchronisme de vitesse (figure 19), une consigne de vitesse est calculée pour l'axe asservi. Après l'activation, l'axe monte immédiatement avec l'accélération spécifiée à la vitesse de synchronisme. Une fonction de transfert linéaire est réalisée

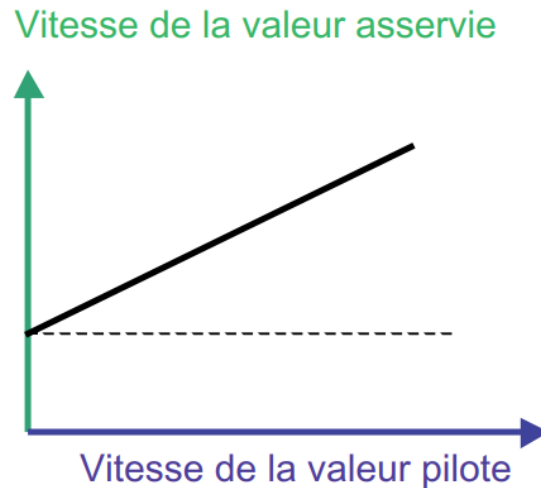


Figure 19: Synchronisme de vitesse

#### 1.9.6.4 Synchronisme selon le profil de came

Le synchronisme selon le profil de came permet d'obtenir une fonction de transfert non linéaire entre la valeur pilote et l'axe asservi comme le montre la figure 20. La valeur asservie est formée à partir de la valeur pilote via la fonction de transfert définie dans le profil de came. Le profil de came est défini par des points intermédiaires ou des fonctions mathématiques et est interpolé entre les valeurs spécifiées.

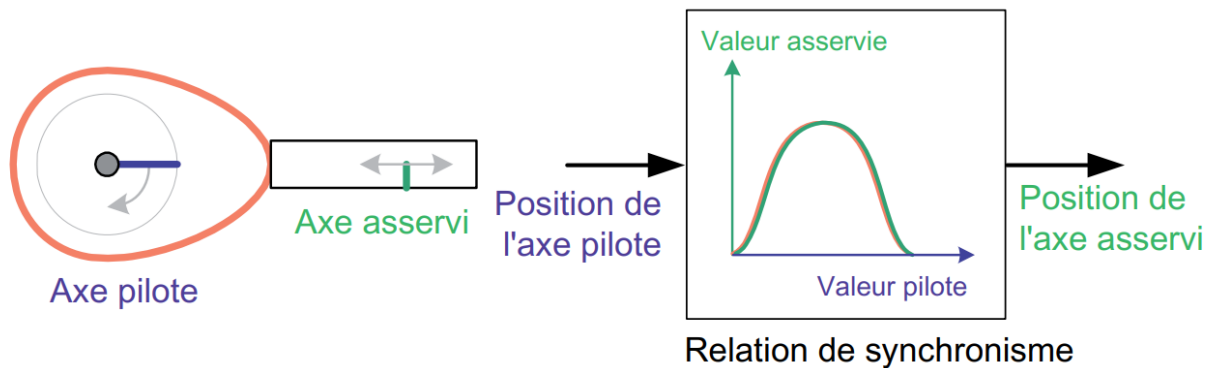


Figure 20: synchronisme selon le profil de came

#### 1.9.6.5 CAM édit

Grâce à l'outil "CAM édit", on peut créer un profil de CAM d'un axe asservi en introduisant des points dans le plan 'Valeurs asservie-Valeurs pilote', Notre courbe va passer par ces points et il est possible de choisir le type d'interpolation comme linéaire ou par splines cubiques ou par splines de Bézier. La figure 21 illustre la façon d'utiliser l'outil CAM édit.

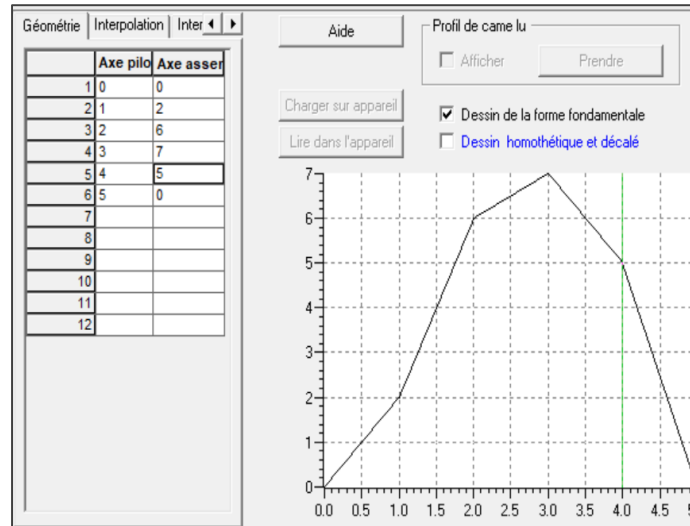


Figure 21: CAM édit

### 1.9.6.6 CAM tool

CAM tool (figure 22) est un autre type de création d'un profil de CAM, dans cet outil on peut dessiner le diagramme de trajectoire en mettant des points et des droites et des courbures, et entre les différents segments crée le CAM tool calcule automatiquement la courbe d'interpolation, et il affiche en plus les diagrammes de vitesse et d'accélération nécessaires pour avoir cette forme de trajectoire.

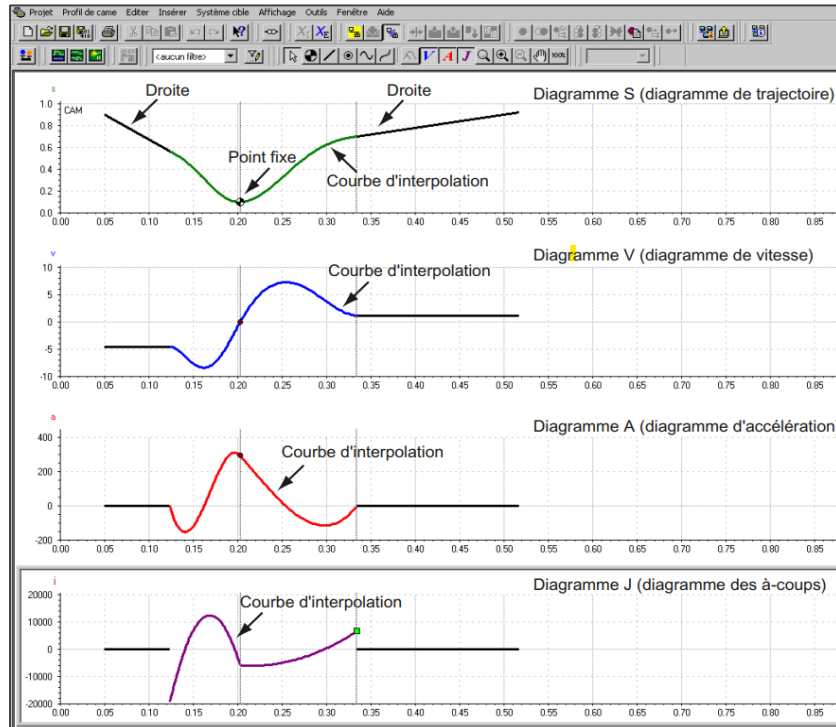


Figure 22 :CAM tool

### 1.9.7 Packages technologiques

Le noyau SIMOTION peut être étendu par le chargement de packages technologiques. On peut accéder à ces packages de la même façon qu'au noyau SIMOTION à partir du programme utilisateur via des instructions de langage supplémentaires.

### 1.9.8 Bibliothèques de fonctions

Les bibliothèques contiennent les blocs habituels pour les tâches fréquemment utilisées. Outre les fonctions standard livrées, l'utilisateur peut également créer des blocs spécifiques et les stocker dans une bibliothèque.

A partir de la version 4.0, les bibliothèques ont été intégrées en tant que blocs fonctionnels et peuvent à présent être ajoutées directement au programme utilisateur à partir de la bibliothèque de commandes :

- Fonctions standard telles que les régulateurs PID, les blocs pilotes pour les modules périphériques spéciaux
- Blocs PLC open conformes pour le pilotage d'axes (blocs mono et multiaxes)

### 1.10 Domaine d'applications

Un grand nombre d'applications est disponible pour SIMOTION ; celles-ci proposent une structure de base ou des configurations complètes spécifiques à un secteur industriel, tel que [7],[9] :

- Machines d'emballage
- Machines textiles
- Machines de production de pneus
- Plastiques
- Technologie de formage des métaux
- Machines de production de verre
- Systèmes de manutention
- Machines de production solaire
- Machine à scie volante
- Coupeuse transversale
- Enrouleuse
- Poseur
- Régulation de traction de bande
- Solution pour des applications de manutention flexibles



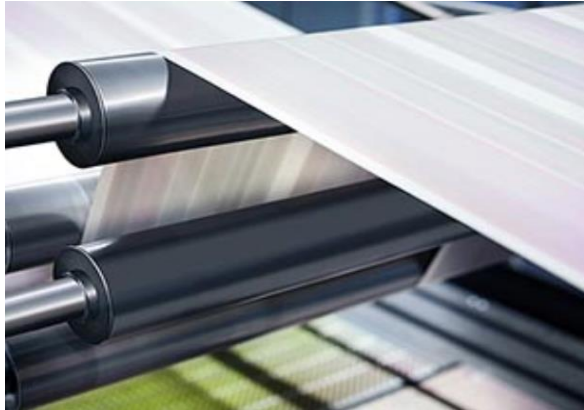


Figure 23: Presses à imprimer



Figure 24 : Machine textile

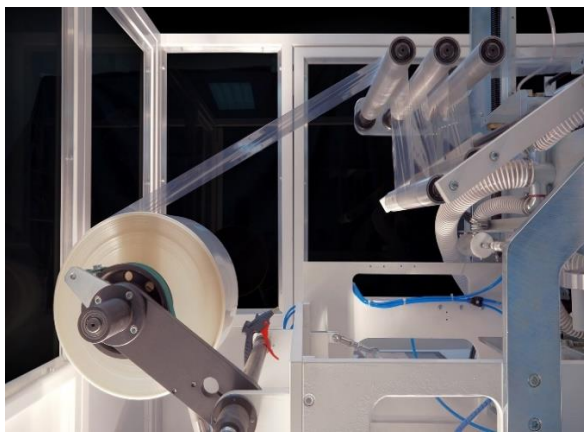


Figure 25: Machines d'emballage



Figure 26 : Machine de production de verre

### 1.10.1 Exemple d'application, machine à scie volante

L'exemple de la machine à scie volante nécessitait des objets technologiques et leur relation entre eux.

L'axe d'entraînement du convoyeur (axe 1) est l'axe maître qui contrôle le mouvement de l'axe suivant (axe 2) à travers la relation 'CAM' de l'objet synchrone. La scie volante fonctionne d'une manière synchrone avec la bande transporteuse et coupe à travers la pièce, (voir les figures ci-dessous)

La position de la pièce est saisie via une entrée de mesure. Les CAMs de sortie contrôlent les butées supérieure et inférieure de la scie. Une fois le processus de sciage terminé, la scie se rétracte en position de départ. [10]

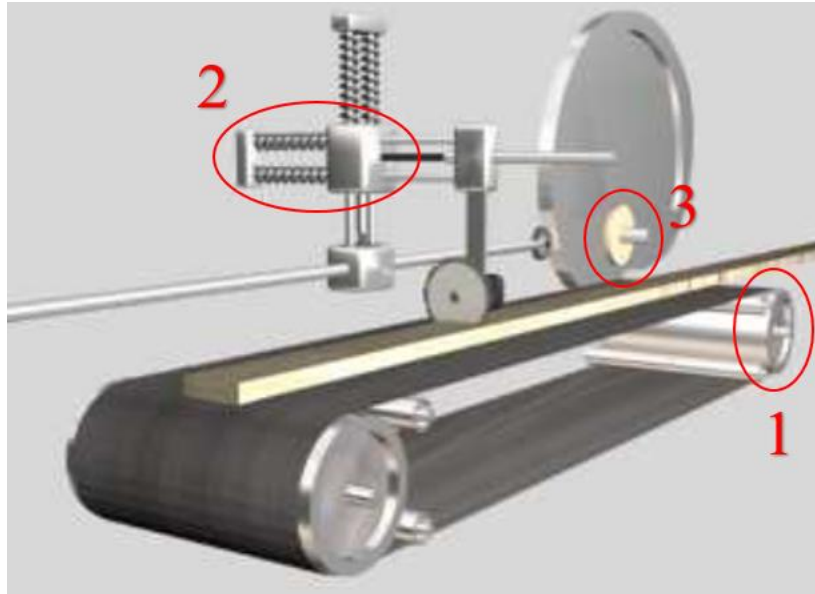


Figure 27: Machine à scie volante

1. L'axe 1 du convoyeur (maître)
2. L'axe 2 de la scie volante (esclave)
3. Axe synchrone avec l'axe 1

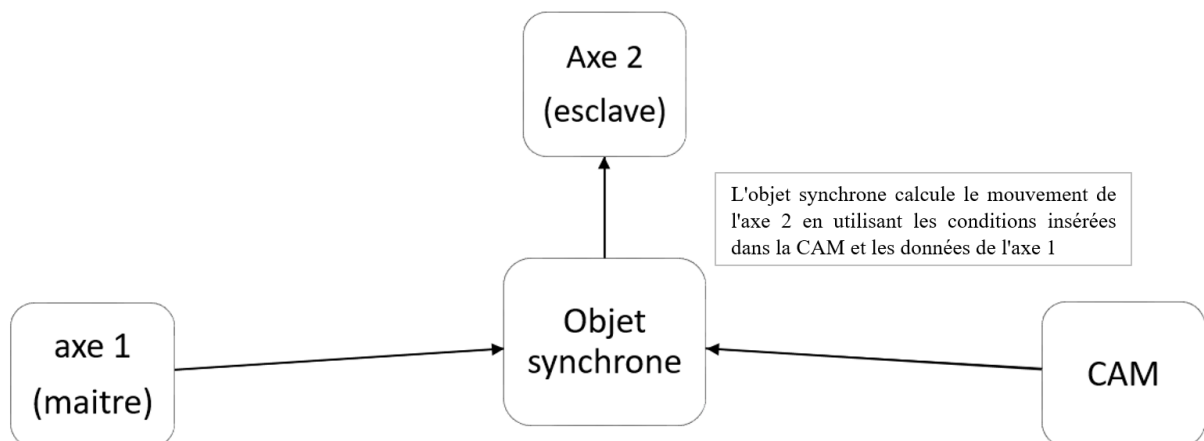


Figure 28: Calcul de mouvement de l'axe esclave

### **1.11 Langages de programmation**

SIMOTION contient une série de langages de programmation orientés tâche qui permettent à l'utilisateur de se concentrer sur les tâches proprement dites. Le modèle de bloc de SIMOTION permet la création de blocs (en fonction de la tâche à remplir) dans différents langages [1].

### 1.11.1 MCC (Motion Control Chart) programmation des séquences de déplacement

MCC comme le montre la figure 29 est un langage de programmation graphique simplifiant considérablement l'automatisation de machines de production.

Les machines de production sont souvent des machines très complexes, dont la commande (SIMOTION) doit également maîtriser, en plus de la logique binaire, des fonctions de calcul et des tâches de gestion des données, le Motion Control et des technologies faisant appel aux fonctions de mouvement les plus diverses.

MCC en est l'outil neutre de description sous la forme d'un organigramme. Cet organigramme est désigné par diagramme MCC dans le présent document. Il fournit tous les symboles nécessaires à la description rapide et efficace de votre problème d'automatisation. MCC offre en outre de multiples possibilités de structuration de gros problèmes[11].

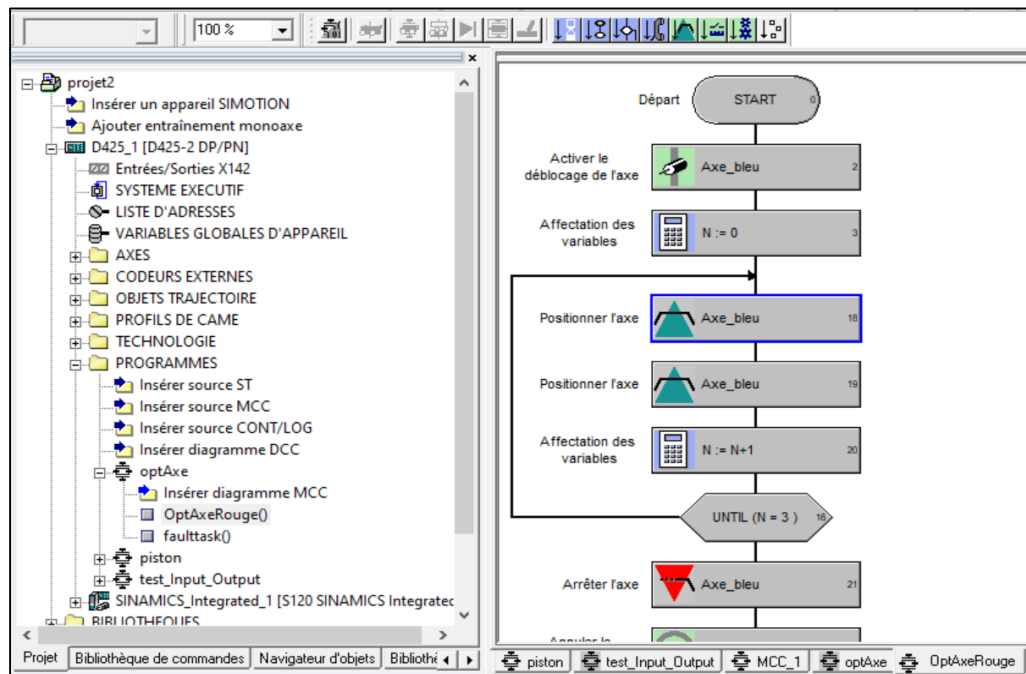


Figure 29 : Exemple d'un programme MCC

#### 1.11.1.1 Propriétés de MCC

- Comparable au Grafcet
- Langage graphique pour la description de séquences de déplacements sous forme de graphes séquentiels
- Les séquences complexes de la technique d'automatisation sont décomposées en différentes étapes
- MCC contient les commandes graphiques pour :
  - Structure de control pour branches et répétition
  - Déplacement des axes
  - Traitement des signaux

### 1.11.1.2 Avantages de MCC

- Même les programmeurs inexpérimentés obtiennent rapidement un résultat
- Les séquences de déplacements peuvent être créées clairement et simplement
- MCC prend en charge le test et par conséquent, la mise en service rapide

### 1.11.2 Programmation CONT/LOG (contacts/logigrammes)

CONT signifie schéma à contacts. CONT est un langage de programmation graphique (Figure 30). La syntaxe des instructions correspond à un schéma de raccordement. CONT permet de suivre le flux de signaux entre les barres conductrices via les entrées, les sorties et les opérations. Les instructions CONT se composent d'éléments et de boîtes qui sont reliés graphiquement à des réseaux (l'affichage d'un réseau est régi par la norme CEI 61131-3). Les opérations CONT fonctionnent selon les règles de la logique Booléenne.

LOG signifie logigramme. LOG est un langage de programmation graphique qui utilise, pour la représentation des éléments logiques, les boîtes logiques de l'algèbre booléenne (l'affichage d'un réseau est régi par la norme CEI 61131-3). Il est également possible de représenter des fonctions complexes (fonctions mathématiques par exemple) directement en association avec les boîtes logiques (Figure 31) [12].

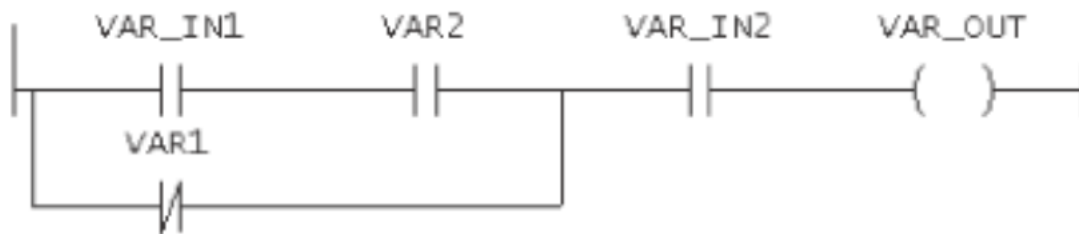


Figure 30: Représentation d'un réseau CONT

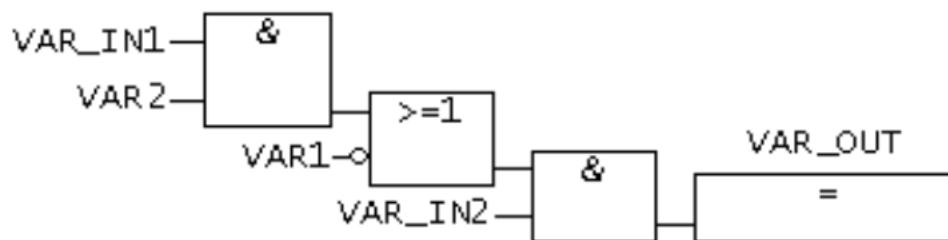


Figure 31: Représentation d'un réseau LOG

- La fonctionnalité Motion Control peut être intégrée de préférence à l'aide d'un bloc fonctionnel de la bibliothèque PLC Open
- LOG utilise l'algèbre Booléenne
- CONT utilise des éléments de programme des schémas de raccordement
- Compatible avec CEI 61131-3 CONT/LOG

- Similaires aux langages FBD et Ladder

### 1.11.2.1 Avantages

- Facile à comprendre et à programmer
- Formulation simple de combinaisons binaires, telles que les conditions de verrouillage
- Simplicité de test et de mise en service des programmes

### 1.11.3 DCC (Drive Control Chart)

#### 1.11.3.1 Propriétés de la programmation DCC (Drive Control Chart)

- Les blocs sont placés et connectés sur une feuille de dessin (voir la figure 32)
- Plusieurs connexions sont possibles :
  - Avec d'autres blocs d'E/S
  - Entre les E/S de la liste E/S
  - Ainsi qu'avec les E/S de blocs d'autres plans
- Les sources et les cibles sont gérées dans la marge
- Utilisable dans SIMOTION et SINAMICS

#### 1.11.3.2 Avantages

- Outil de programmation répandu pour les tâches Motion Control
- Elaboration, test et mise en service rapides

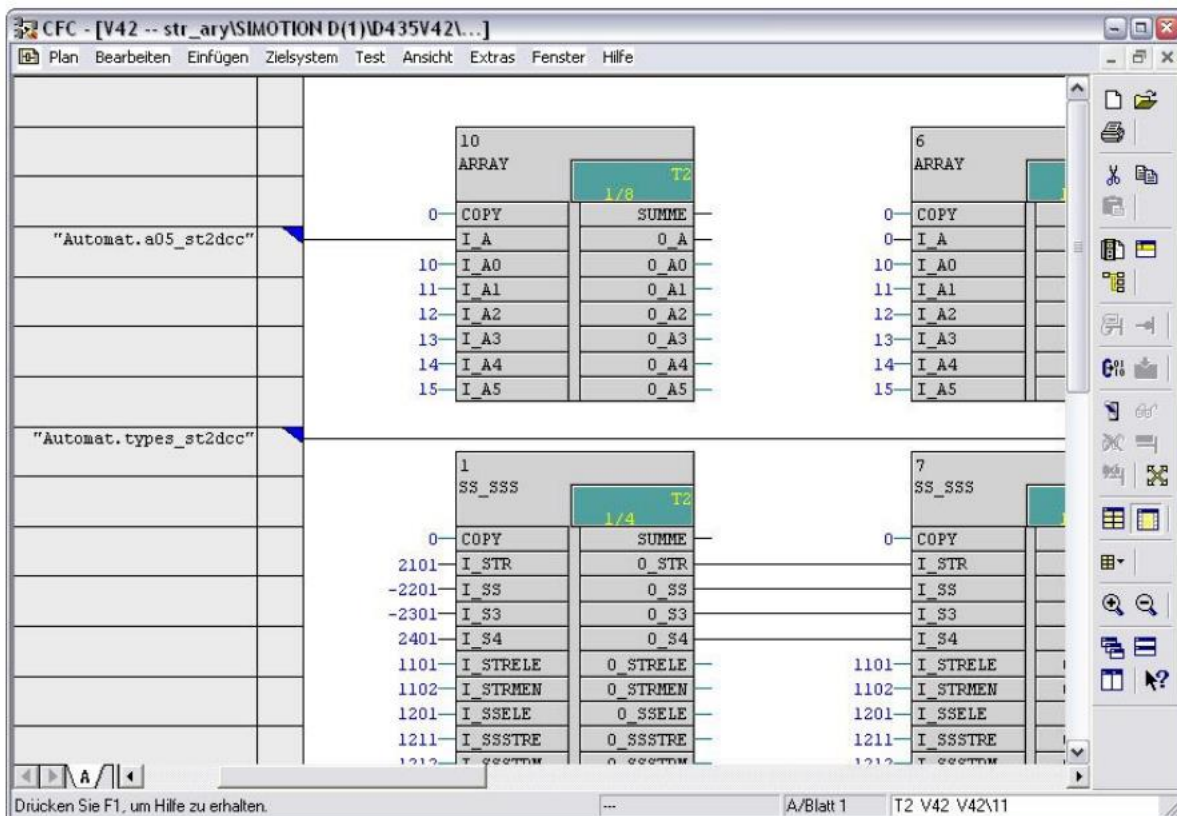


Figure 32: Exemple d'un programme DCC

## 1.11.4 Langage ST, (Structured Text)

### 1.11.4.1 Propriétés du langage ST

- Compatible avec CEI 61131-3 ST
- Contient tous les éléments typiques d'un langage évolué, tels que les opérateurs, les expressions, les instructions de contrôle, etc.
- La fonctionnalité Motion Control est intégrée via des fonctions système et des blocs fonctionnels
- Identique à SIMATIC S7 SCL (Figure 33)

### 1.11.4.2 Avantages

Formulation et élaboration de blocs avec des algorithmes complexes :

- Tâches de régulation
- Tâches de gestion des données
- Optimisation des processus
- Evaluation mathématique/statistique

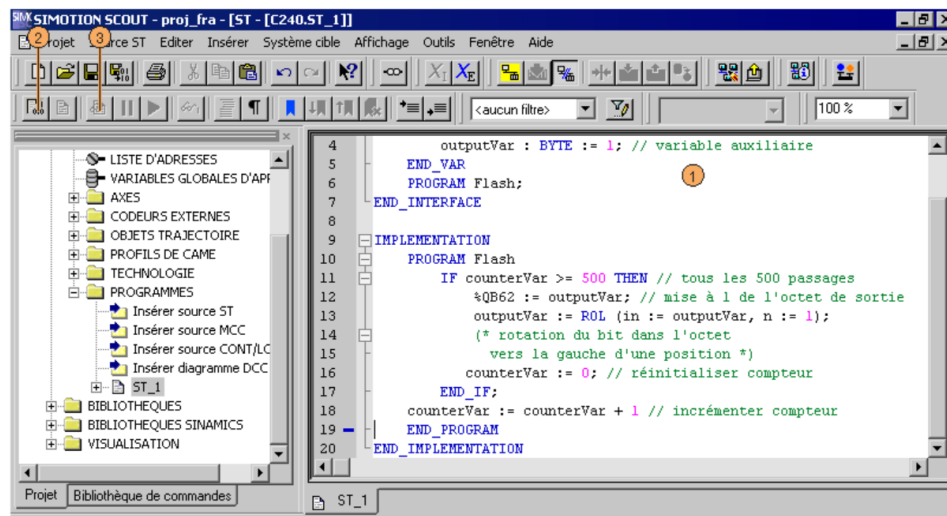


Figure 33: :Exemple d'un programme ST

## 1.12 Structure du Kit de formation

Le kit de formation est une valise qui comporte les modules suivants (voir les figures 34 et 35):

- Module SIMOTION D435
- Moteur 1FK7022-5AK7-1LG3 avec connexion de codeur intégrée
- Moteur 1FK7022-5AK7-1AG3 avec connexion SMC
- Alimentation : Smart Line Module
- Partie puissance : Double Axis Motor Module 3A/3A

Les composants d'entraînement sont raccordés via DRIVE-CLIQ.



Figure 34: Kit de formation Simotion D-435

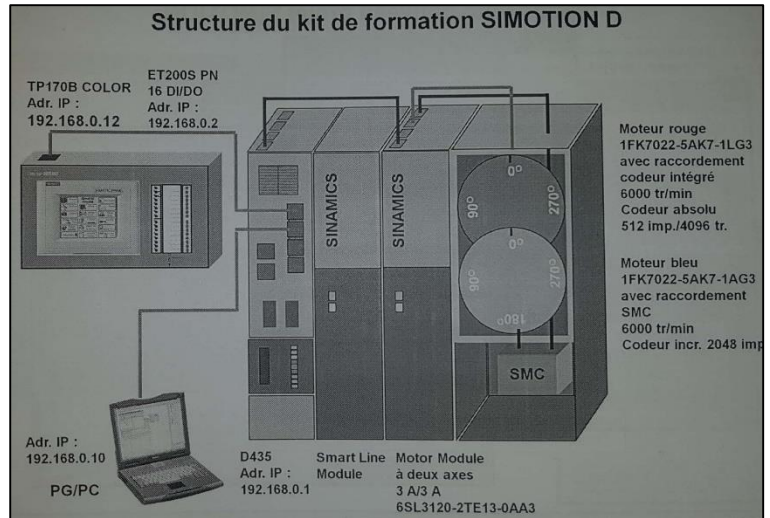


Figure 35 : structure du kit de formation

### 1.13 Avantages de Simotion par rapport aux automates S7-300/400 dans le control de mouvement

Simotion, en tant que système de contrôle de mouvement avancé, présente plusieurs avantages par rapport aux automates programmables de la série S7 300/400. Voici quelques-uns de ces avantages :

**Performances de mouvement optimisées** : Simotion offre des fonctionnalités spécifiques pour le contrôle de mouvement avancé, ce qui permet d'obtenir des performances de mouvement optimales en termes de précision, de vitesse et de synchronisation. Les automates S7 300/400 sont davantage axés sur les tâches de contrôle de processus et de logique générale.

**Flexibilité et adaptabilité** : Simotion offre une grande flexibilité en termes de programmation et de configuration pour s'adapter aux besoins spécifiques de l'application de contrôle de mouvement. Les automates S7 300/400 sont plus adaptés aux tâches de contrôle de processus standard.

**Fonctionnalités de contrôle de mouvement avancées** : Simotion propose des fonctions de contrôle de mouvement avancées telles que le contrôle de boucle fermée, la synchronisation multiaxe, le contrôle de trajectoire et la gestion des cames. Ces fonctionnalités sont spécifiquement conçues pour les applications de contrôle de mouvement complexes.

**Intégration transparente** : Simotion s'intègre facilement aux autres composants du système d'automatisation Siemens, tels que les variateurs de fréquence SINAMICS, les IHM (Interfaces Homme-Machine) SIMATIC et les réseaux industriels PROFINET. Cela permet une intégration harmonieuse et une communication efficace entre les différents niveaux de l'automatisation.

**Capacités de diagnostic avancées** : Simotion offre des fonctionnalités de diagnostic et de dépannage avancées, ce qui facilite la maintenance et le dépannage des systèmes de contrôle de mouvement. Les automates S7 300/400 fournissent également des fonctionnalités de diagnostic, mais Simotion est spécifiquement conçu pour les applications de contrôle de mouvement avancé.



# Chapitre 2 : Plateforme matérielle de Simotion D

---

## Introduction

Le banc d'essais avec lequel on travaille est de type Simotion D. Simotion D est une plateforme matérielle développée pour les applications de contrôle de mouvement. Elle est conçue pour fournir un contrôle performant et fiable de divers types de mouvements, tels que le positionnement, la régulation de vitesse et la régulation de couple. Le matériel Simotion D se compose d'un CPU puissant, de modules d'E/S numériques et analogiques, de modules de communication et d'unités d'alimentation électrique. Le CPU est basé sur le processeur Intel Pentium et exécute le micrologiciel Simotion, qui assure la fonction de contrôle en temps réel. Les modules d'E/S numériques et analogiques sont utilisés pour interagir avec les capteurs et actionneurs qui font partie du système de mouvement. Les modules de communication assurent la connectivité avec divers réseaux de terrain tels que Profinet, Profibus et Ethernet/IP. Les unités d'alimentation électrique sont conçues pour fournir la tension et le courant nécessaires pour alimenter le système Simotion D. Avec son CPU performant, ses modules d'E/S flexibles et fiables, ainsi que ses modules de communication et d'alimentation électrique, le matériel Simotion D est bien adapté à un large éventail d'applications de contrôle de mouvement, du simple positionnement à un seul axe au contrôle de mouvement synchronisé complexe multi-axes.

## 2.1 Groupement d'axes dans un système Simotion D

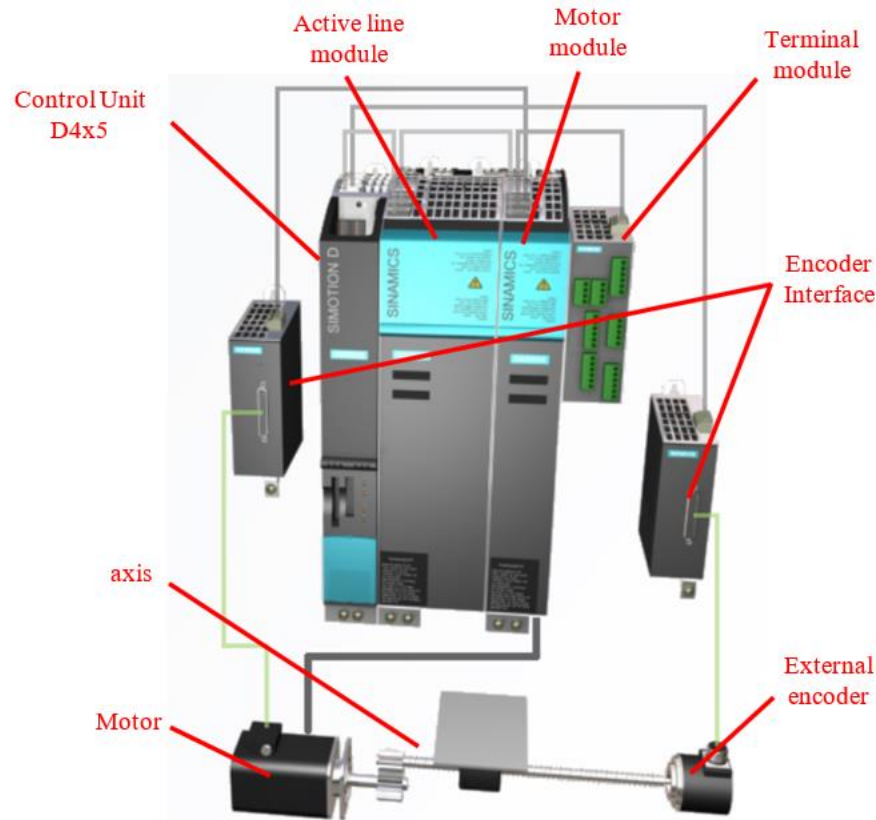


Figure 36: Groupement d'axes dans un système Simotion D

Un système d'axes typique comprend les modules suivants (Figure 36) :

### 2.1.1 Simotion D4x5

La D4x5 (Control unit) comprend le système de runtime programmable de SIMOTION pour le pilotage des mouvements et l'asservissement de position de jusqu'à 16 axes (voir la figure 37). Le module comprend également l'unité de commande de SINAMICS S120 pour la régulation de la vitesse et du courant. L'unité de commande peut également assurer la régulation d'une unité d'alimentation intelligente (Active Line Module).

### 2.1.2 Unité d'alimentation

L'alimentation SINAMICS (Line Module) génère la tension du circuit intermédiaire à partir du réseau.

### 2.1.3 Parties puissance

Les parties puissance SINAMICS (Motor Modules) servent à la commande des moteurs.

### **2.1.4 Drive-CLIQ**

La communication entre les différents composants du système d'entraînement est assurée par une communication série rapide via des connexions DRIVE-CLiQ. En plus des composants de puissance, il est possible, via DRIVE-CLiQ, de raccorder des capteurs de vitesse et des périphériques DRIVE-CLiQ à proximité des entraînements, tels que des codeurs SMC ou des Terminal Modules.

Il est maintenant aussi possible d'effectuer un diagnostic par le biais de l'interface DRIVE-CLiQ jusqu'aux différents composants.

La D4x5 dispose de 4 connexions Drive-CLiQ. C'est ici que sont raccordés les parties puissance, l'alimentation et les autres modules.

### **2.1.5 Les entrées/sorties**

Les entrées/sorties TOR sont affectées à SINAMICS et peuvent être utilisées pour la commande de l'entraînement.

### **2.1.6 Alimentation**

Connexion 24 V pour l'alimentation de l'électronique du module.

### **2.1.7 Slot pour options**

Le TB30 peut être enfiché dans ce slot. Le TB30 est une carte d'extension avec 4 DI, 4 DO, 2 AI et 2 AO pouvant être enfichée dans la D4x5.

### **2.1.8 Connection Ethernet**

La D4x5 dispose de deux connexions Ethernet qui peuvent être utilisées par SIMOTION pour, par ex., le raccordement d'un PC ou d'un appareil IHM.

### **2.1.9 Connection Profibus**

Ces connexions permettent de raccorder d'autres entraînements ou périphériques décentralisés.

### **2.1.10 Slot pour la carte CF**

Emplacement de la carte mémoire (carte Compact Flash)

### **2.1.11 Emplacement BOP**

Emplacement pour le BOP (Basis Operator Panel, en préparation)

### **2.1.12 Sélecteur de mode de fonctionnement**

Ce commutateur rotatif permet de régler le mode de fonctionnement de la CPU, par ex. RUN. A côté se trouve une rangée de LED indiquant l'état de la CPU. Ce slot permet d'installer des modules optionnels tels que d'autres périphériques.

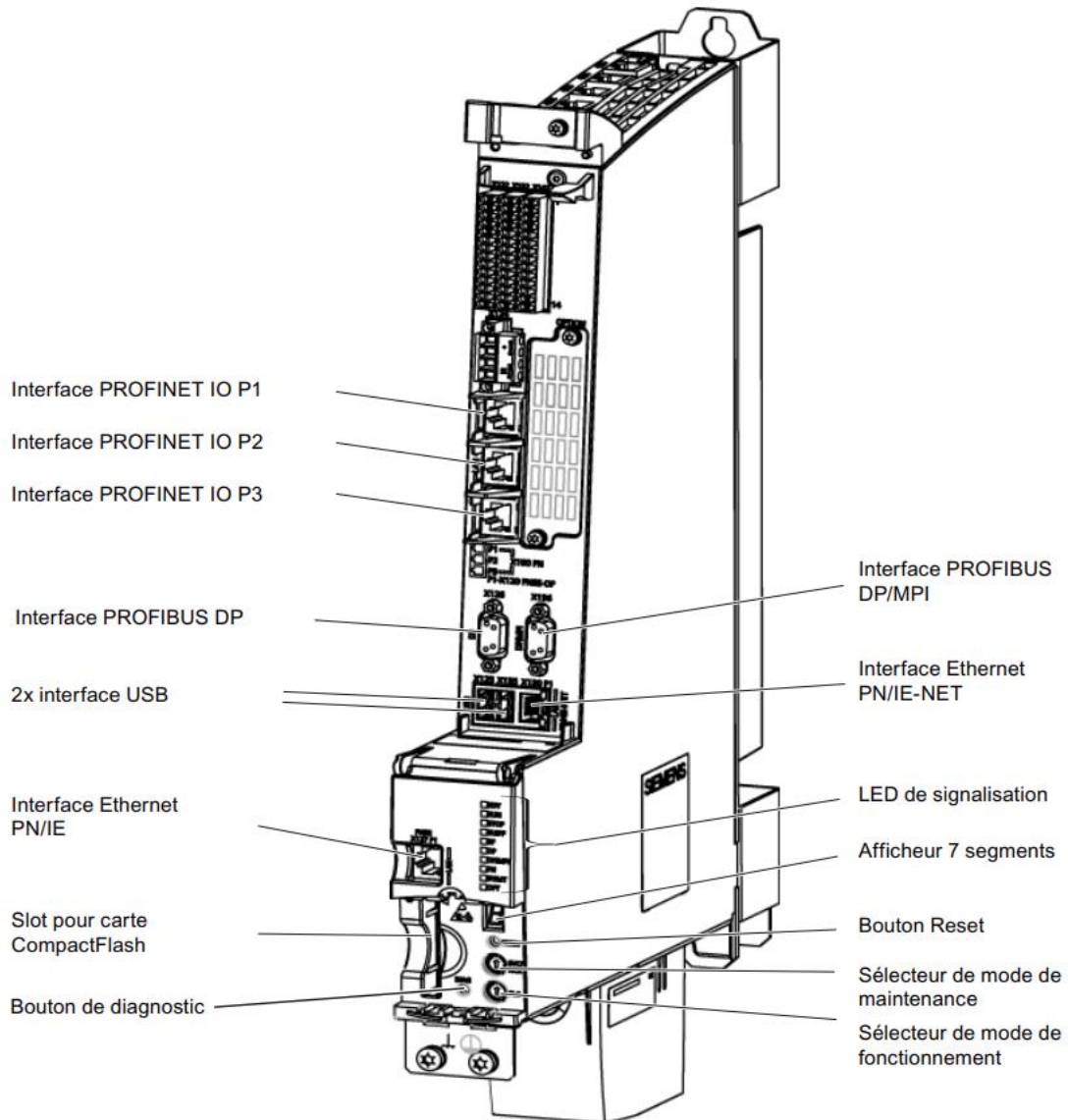


Figure 37 : Schéma de raccordement de SIMOTION D4x5

## 2.2 Structure de Simotion D4x5

SIMOTION D utilise le module SIMOTION D4x5 comme matériel centralisé (**Erreur ! Source d u renvoi introuvable.**).

Celui-ci se compose du module runtime SIMOTION (SIMOTION RT) et de l'unité de commande SINAMICS S120.

La partie SIMOTION prend en charge le pilotage des mouvements et l'asservissement de position des axes. L'unité de commande SINAMICS effectue la régulation de la vitesse et du courant des entraînements raccordés. L'unité SINAMICS peut également assurer la régulation de l'unité d'alimentation (ALM = Active Line Module).

Le nombre d'entraînements pouvant être raccordés dépend du mode de fonctionnement sélectionné (régulation de type Servo ou Vector) :

- Servo, maximum 6 entraînements plus 1 ALM, ou
- Servo avec canal de consigne, actuellement 4 entraînements max. Plus 1 ALM, ou
- Vector, actuellement 4 entraînements max. Plus 1 ALM

Un fonctionnement mixte Servo et Vector est impossible.

La partie SIMOTION communique avec l'unité de commande SINAMICS intégrée par le biais d'un bus PCI intégré (PROFIBUS\_Integrated). Cette liaison par bus est configurée de la même manière que les deux sous-réseau PROFIBUS externes qui peuvent être raccordés au SIMOTION RT [5].

## 2.3 Différentes versions de Simotion D4x5

### 2.3.1 Système multiaxes

Les différentes versions de Simotion D4x5 comme le montre le tableau ci-dessous offrent des performances et des fonctionnalités adaptées à différents types d'applications de contrôle de mouvement, allant des applications de petite taille et de faible complexité aux applications de grande taille et haute complexité.

Version D4x5	Nombre d'axes	Description
Simotion D425	16	Ce contrôleur est conçu pour des applications de mouvement de petite à moyenne taille. Il est équipé d'un processeur Intel Core i7 et d'une interface Ethernet intégrée.
Simotion D435	32	Ce contrôleur est conçu pour des applications de mouvement de taille moyenne à grande. Il est équipé d'un processeur Intel Core i7 et d'une interface Ethernet intégrée.
Simotion D445	64	Ce contrôleur est conçu pour des applications de mouvement de grande taille et haute complexité. Il est équipé d'un processeur Intel Xeon et d'une interface Ethernet intégrée.
Simotion D455	128	Ce contrôleur est conçu pour des applications de mouvement de grande taille et haute complexité. Il est équipé d'un processeur Intel Xeon et d'une interface Ethernet intégrée.

Tableau 4: Les versions de Simotion D4x5

### 2.3.2 Système mono axe

Simotion D410 est un contrôleur de mouvement de taille moyenne et de complexité modérée, qui convient aux applications nécessitant un contrôle précis d'un seul axe de mouvement. Il est équipé d'un processeur Intel Core i7-6822EQ cadencé à 2,0 GHz et dispose d'interfaces Ethernet, PROFIBUS DP, PROFINET IO et RS485 pour la communication avec les autres équipements de l'usine.

## 2.4 Connexion via DRIVE-CLiQ

Les composants de la gamme SINAMICS S120 et la SIMOTION D4x5 avec CX32 se raccordent entre eux par DRIVE-CLiQ. DRIVE-CLiQ est un système de communication permettant à la SIMOTION D4x5 de détecter automatiquement les composants raccordés (Figure 38). Il fournit un faisceau de câblage dont la topologie peut être visualisée dans SIMOTION SCOUT.

Pour le câblage avec DRIVE-CLiQ, il convient de respecter les règles suivantes :

- Les câblages en anneau ne sont pas autorisés.
- Les composants ne doivent pas être câblés en double.
- 16 abonnés sont admis au maximum sur un connecteur DRIVE-CLiQ de l'unité de commande (CU320).
- 8 abonnés au maximum peuvent être connectés en série. Une série est toujours considérée du point de vue de l'unité de commande.
- Dans le cas d'un Motor Module, connecter également le capteur du moteur [5].

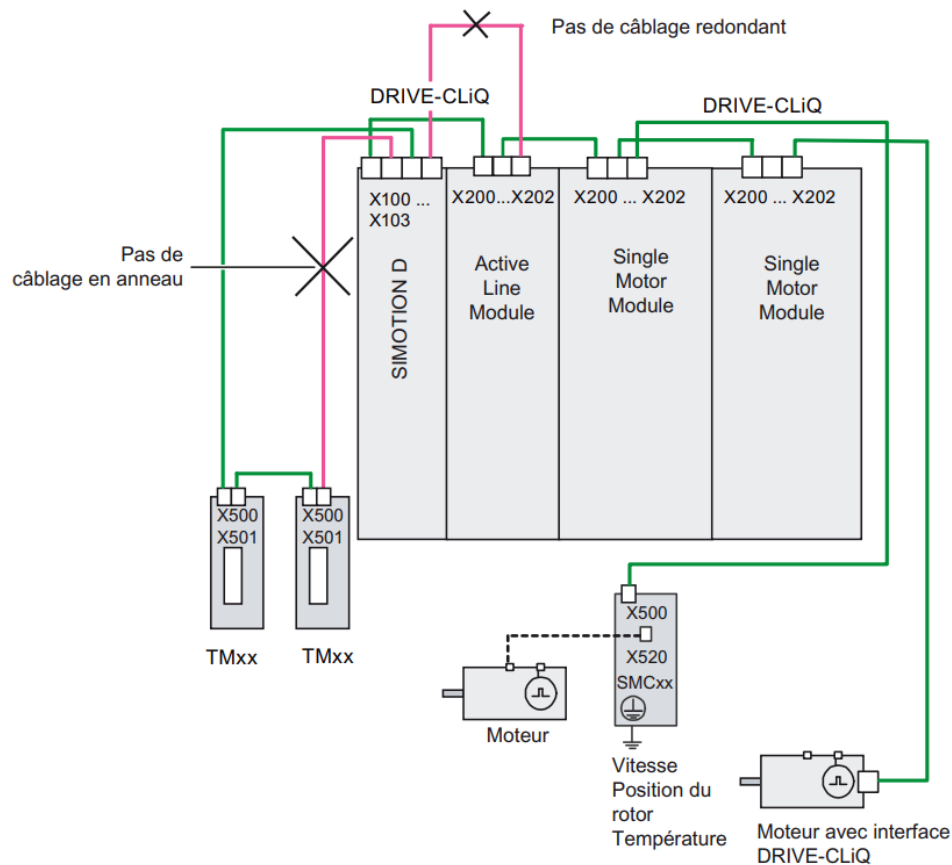


Figure 38 : Câblage des composants via DRIVE-CLiQ

## 2.5 Modules D'alimentation

Les modules de ligne (Line Module) génèrent une tension continue pour le circuit intermédiaire à partir de la tension réseau connectée. Le circuit intermédiaire à tension continue est ensuite utilisé par les différents modules de moteur (Motor Module).

Les Active Line Module et les Smart Line Modules sont équipés d'interfaces DRIVE-CLIQ pour la communication avec l'unité de commande (Tableau 5).

Propriétés :

- Possibilité de fonctionnement sur réseaux TN, TT et IT
- Refroidissement interne/externe par air
- Résistance contre les court-circuit à la terre
- Barres du circuit intermédiaire et barres d'alimentation de l'électronique intégrées
- Affichage d'état et diagnostics par LED

Active Line Module	Tension du circuit intermédiaire stabilisée Fonctionnement possible en récupération Courants réseau sinusoïdaux Plaque signalétique électronique Interface DRIVE-CLIQ pour la communication avec la Control Unit
Smart Line Module	Tension du circuit intermédiaire non stabilisée Fonctionnement possible en récupération Courants réseau en forme de bloc
Basic Line Module	Tension du circuit intermédiaire non stabilisée Réinjection impossible Courants réseau en forme de bloc

Tableau 5: Modules d'alimentations

## 2.6 Modules de puissance

Les Modules Moteur (Figure 39) constituent les unités de puissance des entraînements individuels.

Une distinction est faite entre :

- Modules Moteur Simple pour un entraînement
- Modules Moteur Double pour deux entraînements

En principe, tous les Modules Moteur Simples et Doubles peuvent fonctionner en combinaison avec les Modules de Ligne « Basic », « Smart » et « Active » dans la plage de tension appropriée.

Propriétés :

- Grâce à une puissance massique élevée, notamment pour les Double Motor Modules, le dispositif présente une construction compacte.
- Le circuit intermédiaire et les barres d'alimentation sont intégrés à une tension de 24 V CC.
- Une LED de diagnostic est incluse.
- Il offre une résistance contre les courts-circuits et les courts-circuits à la terre.

- Il intègre des fonctions de sécurité telles que la "Commande sûre de frein moteur" et l'"Arrêt sûr". Le frein moteur et le court-circuit d'induit sont connectés en interne.
- Le moteur peut être connecté soit par un connecteur (jusqu'à 30 A), soit par un boulon fileté.

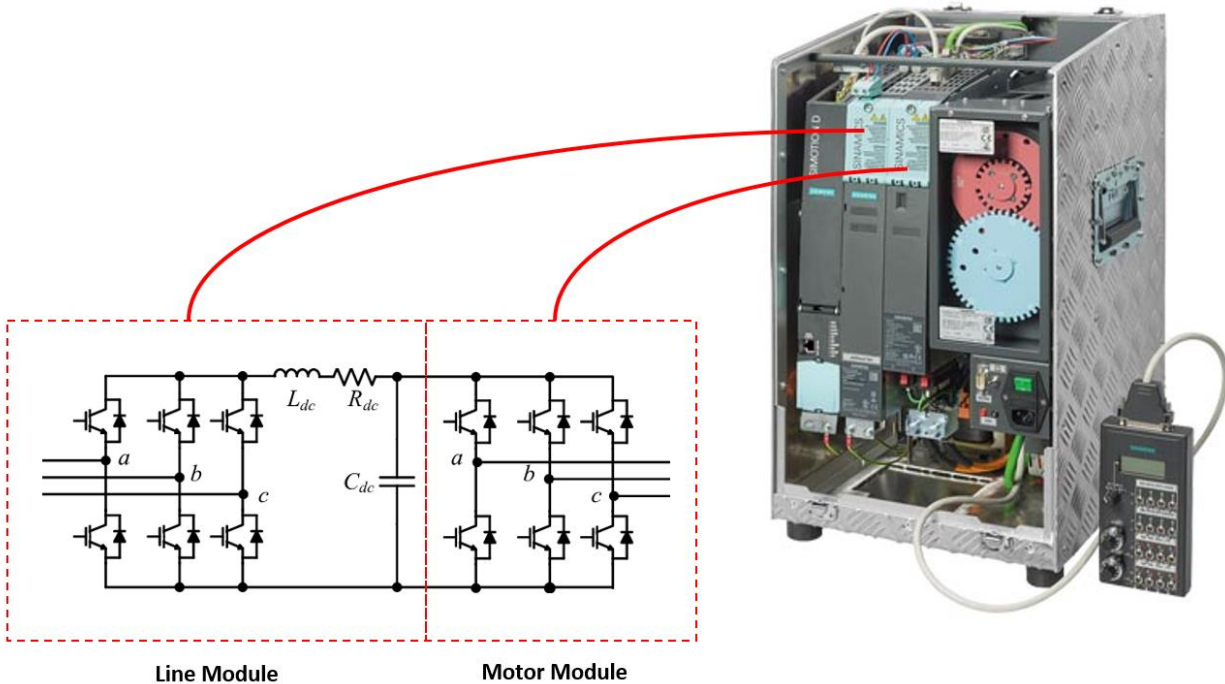


Figure 39 : Module de moteur et module de ligne

## 2.7 Capteurs

### 2.7.1 Encodeurs

Les encodeurs sont des dispositifs électroniques qui mesurent la position, la vitesse et l'orientation des objets en mouvement. Ils fonctionnent en utilisant un disque de codage qui tourne en même temps que l'objet en mouvement et envoie des signaux électriques correspondants à la position et à la vitesse de l'objet. Les encodeurs sont équipés de capteurs optiques ou magnétiques qui lisent les signaux électriques pour déterminer la position et la vitesse de l'objet en mouvement.

Il existe deux types d'encodeurs : incrémentale et absolu (figure 40).



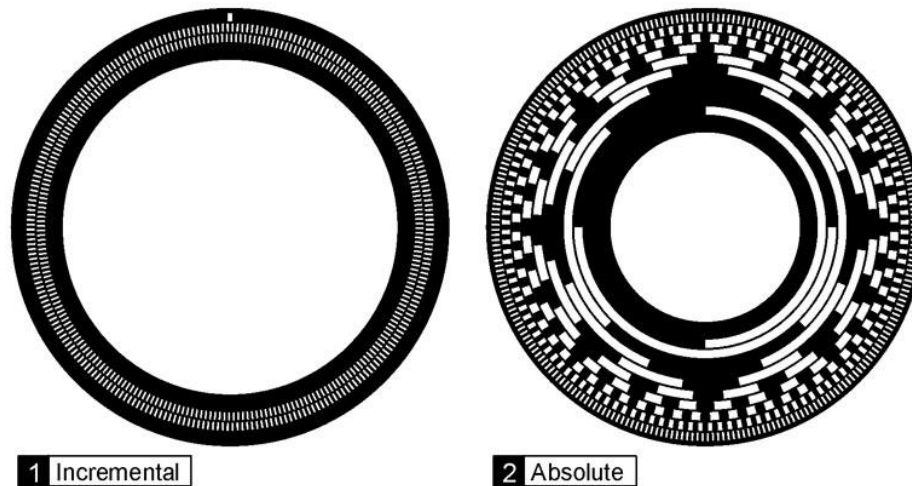


Figure 40: disques de codages d'encodeur incrémentale et absolu

La principale différence entre un encodeur absolu et un encodeur incrémental est que l'encodeur absolu est capable de fournir la position exacte de l'arbre ou de l'objet en mouvement sans avoir besoin de référencer une position de départ, tandis que l'encodeur incrémental nécessite une référence de position de départ pour mesurer les mouvements incrémentaux.

L'encodeur absolu utilise une série de codes uniques pour représenter la position exacte de l'arbre ou de l'objet en mouvement. Il est capable de fournir une lecture précise de la position, même en cas de coupure d'alimentation ou de perte de position, car les codes sont stockés dans un système de mémoire permanente. En revanche, l'encodeur incrémental utilise des impulsions électriques pour mesurer les mouvements relatifs entre la position de départ et la position actuelle, et ne peut pas fournir la position absolue sans une référence de position de départ.

C'est en fonction du type d'encodeur qu'on fait le référencement qu'on va voir dans la validation expérimentale.

### 2.7.2 Sensor-Modules

Les Sensor-Modules sont des dispositifs utilisés pour surveiller et contrôler les performances des moteurs électriques, ils donnent plus d'information que les encodeurs, tel que le courant, la tension, la température du moteur, le flux magnétique ...

**SMC (Sensor Module Compact)** : Il s'agit d'un module de capteur compact qui peut être installé directement sur le moteur pour surveiller la température, la vitesse, la position, etc. Les données du capteur sont transmises à un système de contrôle pour la surveillance et la protection du moteur.

**SME (Sensor Module Extend)** : Il s'agit d'un module de capteur plus avancé qui peut être utilisé pour surveiller les vibrations, les champs magnétiques, la puissance, etc. Le SME fournit des informations supplémentaires sur la performance du moteur pour aider à optimiser le fonctionnement et la maintenance.

**SMI (Sensor Module Integrated)** : Il s'agit d'un module de capteur intégré dans le moteur lui-même. Il est conçu pour être utilisé dans des applications de haute performance où des mesures précises et rapides sont nécessaires. Le SMI est généralement utilisé pour des applications telles que les turbines à gaz, les compresseurs, les pompes à haute pression, etc.

# Chapitre 3 : Commande des moteurs synchrones

---

## Introduction

Comme le banc d'essais comprend des moteurs synchrones à aimant permanent, il est préférable de commencer par expliquer la modélisation et la commande des machines synchrones avant d'aborder la programmation dans Scout. Les machines synchrones sont des machines électriques qui tournent en synchronisme avec leur alimentation et sont couramment utilisées dans diverses applications. La commande des machines synchrones est un processus crucial pour assurer leur bon fonctionnement, leur efficacité énergétique ainsi qu'une réponse rapide et précise. Elle implique la régulation de la tension, de la fréquence et du courant dans la machine synchrone pour maintenir une performance optimale. Dans ce chapitre, nous allons donc aborder les équations qui définissent le fonctionnement des machines synchrones, puis procéder à des simulations de modélisation et de commande vectorielle.

### **3.1 Domaines d'applications**

Les moteurs synchrones sont largement utilisés dans des applications nécessitant une vitesse constante, une haute performance et un faible coût d'exploitation. Voici quelques exemples d'applications des moteurs synchrones :

- Pompes : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les pompes à haute performance dans les usines de traitement de l'eau, les usines chimiques et les centrales thermiques.
- Compresseurs : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les compresseurs dans les usines de gaz naturel, les raffineries de pétrole et les usines de traitement chimique.
- Convoyeurs : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les convoyeurs à haute vitesse dans les usines de production automatisées.
- Véhicules électriques : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les systèmes de propulsion des véhicules électriques en raison de leur haute efficacité et de leur faible coût d'exploitation.
- Machines-outils : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les machines-outils à haute performance telles que les fraiseuses CNC, les tours à commande numérique, etc.
- Machines textiles : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les machines textiles à haute vitesse telles que les métiers à tisser et les machines à tricoter.
- Équipements de levage : Les moteurs synchrones sont utilisés pour alimenter les équipements de levage tels que les grues, les treuils, etc.

### **3.2 MODELE DE REFERENCE**

Pour aborder l'étude des modèles de la machine synchrone, il est convenable de définir un modèle de référence donnant une description plus ou moins valable de la machine. A partir du modèle de référence, on procédera, à l'établissement du modèle de Park.

A l'heure actuelle, le modèle de référence des machines synchrones classiques est relativement bien établi.

D'un point de vue électromagnétique, le modèle de base consiste à considérer une machine synchrone à pôles saillants ayant une paire de pôles au rotor et un enroulement statorique triphasé, (enroulements a, b et c). L'enroulement inducteur se trouve sur le rotor de la machine selon l'axe de la saillance, appelé axe direct ou axe longitudinal de la machine (enroulement F "Field").

La présence de grilles ou de cage d'amortissement au rotor, ou encore l'éventuel effet amortisseur du fer, sont modélisés par deux circuits amortisseurs équivalents : l'un situé sur l'axe direct (enroulement D) et l'autre sur l'axe perpendiculaire appelé axe en quadrature ou axe transversal de la machine (Enroulement Q) (voir la figure 41) [13].

### 3.3 Equations électriques :

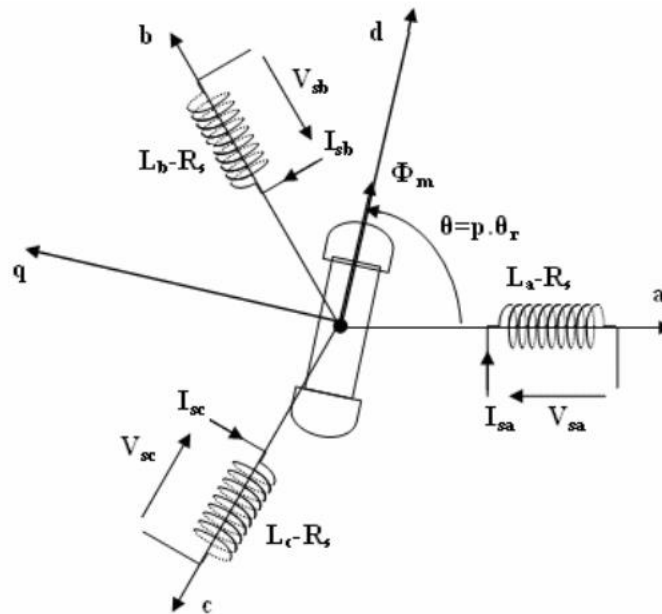


Figure 41 : Représentation schématique d'une machine synchrone à aimant permanent

La machine obéit aux hypothèses simplificatrices :

- L'effet hystérésis et les pertes dans l'acier sont négligeables.
- La machine fonctionne dans un régime non saturé et les lignes d'induction dans l'entrefer sont radiales.
- Les réactances de fuites sont indépendantes de la position du rotor.
- Les paramètres de la machine sont indépendants des courants et de la vitesse de rotation.
- Les résistances sont indépendantes de la température.

La distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale, ce qui nous permet de considérer seulement le premier harmonique d'espace de la distribution de la force magnétomotrice, créée par chaque phase de l'induit.

Avec ces hypothèses, les différents circuits électriques satisfont l'équation électrique fondamentale suivante :

$$V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \quad (1)$$

$$V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \quad (2)$$

$$V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \quad (3)$$

Tel que :

$R_s$  : résistance d'un enroulement statorique.

$I_s, abc$  : les courants des phases statoriques.

$\Phi_{abc}$  : les flux produits par les phases statoriques.

$V_s, abc$  : les tensions des phases statoriques.

D'autre part :

$$\varphi_{sa} = L_s I_{sa} + M_{ss} I_{sb} + M_{ss} I_{sc} \quad (4)$$

$$\varphi_{sb} = L_s I_{sb} + M_{ss} I_{sc} + M_{ss} I_{sa} \quad (5)$$

$$\varphi_{sc} = L_s I_{sc} + M_{ss} I_{sa} + M_{ss} I_{sb} \quad (6)$$

Tel que :

$L_s$  : l'inductance propre d'une phase statorique

$M_{ss}$  : mutuelle inductance entre deux phases du stator

$M_{sf}$  : mutuelle inductance entre stator et rotor (dans le cas du rotor a aimant  $M_{sf}$  vaut 0)

En remplaçant les expressions des flux dans les équations précédentes et en les écrivant sous une forme matricielle on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & 0 & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

### **3.4 Equations mécaniques :**

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$C_e - C_r - f\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

Tel que :

$J$  : moment d'inertie

$w$  : vitesse de rotation

$C_e$  : couple électromagnétique

$C_r$  : couple résistant

$f$  : coefficient de frottement.

### **3.5 Transformation de Park**

La transformation de PARK est une technique utilisée pour convertir les signaux triphasés en signaux biphasés. Cette technique a été initialement développée par John Park en 1929, puis améliorée par Edith Clarke dans les années 1950.

Elle permet de transformer les coordonnées de tension et de courant triphasés en coordonnées de tension et de courant biphasés, appelées courant direct ( $I_d$ ) et courant quadratique ( $I_q$ ). Le courant direct est égal à la moyenne des courants triphasés, tandis que le courant quadratique est le courant alternatif orthogonal au courant direct.

La transformation de Park est utilisée dans les systèmes de contrôle de moteurs électriques, car elle permet de simplifier les calculs de commande et de régulation. En convertissant les signaux triphasés en signaux biphasés, elle rend les calculs de commande plus simples et plus intuitifs.

Le contrôle vectoriel du moteur électrique est un exemple courant d'utilisation de la transformation de Park. Dans ce système, les signaux triphasés sont convertis en signaux biphasés en utilisant la transformation de Park, puis les signaux sont utilisés pour commander les courants d'alimentation du moteur. Le contrôle vectoriel permet de contrôler avec précision la vitesse et la position du moteur, ainsi que la direction de rotation.

La transformation de Park est également utilisée dans d'autres applications de l'électronique de puissance, telles que les onduleurs, les convertisseurs de puissance et les systèmes de contrôle de la qualité de l'énergie. Dans ces applications, la transformation de Park est utilisée pour simplifier les calculs de commande et de régulation, et pour assurer une commande précise et efficace des systèmes électriques [14].

Voici la matrice de Park :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Tel que :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Sachant que  $\theta$  est l'angle de rotation de Park ,

Et voici la matrice inverse de Park :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Tel que :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix}$$

En écrivant les équations (1), (2), (3) sous la forme matricielle on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\
 V_{sb} &= R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\
 V_{sc} &= R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt}
 \end{aligned}
 \quad \longrightarrow \quad
 [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s]$$

Puis on remplace les matrices triphasées de tension, de courant, et de flux avec les matrices direct-quadratique-homopolaire :

$$\begin{aligned}
 [P]^{-1}[V_{dq0}] &= [R][P]^{-1}[I_{dq0}] + \frac{d}{dt} ([P]^{-1}[\varphi_{dq0}]) \\
 [V_{dq0}] &= [R][I_{dq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dq0}] + [P]\left(\frac{d}{dt}[P]^{-1}\right)[\varphi_{dq0}] \\
 [V_{dq0}] &= [R][I_{dq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dq0}] + [P]\left(\frac{d}{dt}[P]^{-1}\right)[\varphi_{dq0}]
 \end{aligned} \quad (11)$$

Après le calcul on trouve :

$$[P]\left(\frac{d}{dt}[P]^{-1}\right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

On remplace (12) dans (11), et On remplace  $V_{dq0}$ ,  $I_{dq0}$ ,  $\varphi_{dq0}$  par leurs valeurs on trouve (sachant que le moteur est a aimant permanent):

$$\begin{cases}
 V_d = RI_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \varphi_q \\
 V_q = RI_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \varphi_d \\
 \varphi_d = L_d I_d + \varphi_f \\
 \varphi_q = L_q I_q
 \end{cases} \quad (13)$$

Soit :  $\frac{d\theta}{dt} = w$  ; Donc :

$$\begin{cases}
 V_d = RI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \\
 V_q = RI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega(L_d I_d + \varphi_f)
 \end{cases} \quad (14)$$

En d'autre terme :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 1 \\ 0 & L_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \\ \mathbf{[V]} &= \mathbf{[R][I]} + \mathbf{[L]} \frac{d}{dt} \mathbf{[I]} + \omega \mathbf{[A][I]} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{3}{2} P (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d) \\ C_e - C_r - f \omega_m &= J \frac{d\omega_m}{dt} \\ \omega &= \omega_m p \end{aligned}$$

Tel que p est le nombre de paires de pôles

L'équation (15) peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega \left( \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \right) \quad (18)$$

Donc :

$$\mathbf{[V]} = \mathbf{[R][I]} + \mathbf{[L]} \frac{d}{dt} \mathbf{[I]} + \omega (\mathbf{[A][I]} + \mathbf{[Phi]}) \quad (19)$$

Maintenant on cherche à écrire les équations précédentes sous forme d'équations d'état, c-d-a sous cette forme :

$$\dot{\mathbf{[I]}} = \mathbf{[A][I]} + \mathbf{[B][V]} \quad (20)$$

D'après le système d'équations (14) :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{V_d}{L_d} - \frac{R}{L_d} I_d + \omega \frac{L_q}{L_d} I_q \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{V_q}{L_q} - \frac{R}{L_q} I_q - \omega \frac{L_d}{L_q} I_d - \frac{\omega}{L_q} \varphi_f \end{cases} \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (22)$$

Par identification avec (20) on met :

$$\mathbf{[A]} = \mathbf{[A_1]} + \omega \mathbf{[A_2]} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix}$$



$$[B] = [B_1] + \omega[B_2] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$$

Alors :

$$[i] = ([A_1] + \omega[A_2])[I] + ([B_1] + \omega[B_2])[V]$$

D'autre part :

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(C_e - C_r - f\omega_m) \quad (23)$$

$$C_e = \frac{3}{2}P(\varphi_f I_q + L_d I_d I_q - L_q I_q I_d) \quad (24)$$

A partir des équations (22) et (23) on trouve :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} & 0 \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{J} & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \\ C_r \\ C_e \end{bmatrix} \quad (25)$$

### 3.6 Commande Vectorielle

La commande vectorielle est une méthode de contrôle qui permet de contrôler précisément la vitesse et le couple des moteurs en utilisant des vecteurs mathématiques pour représenter les grandeurs électriques et magnétiques du moteur.

La commande vectorielle fonctionne en séparant le courant d'entrée en deux composantes : le courant magnétique et le courant de couple. Le courant magnétique est responsable de la création du champ magnétique tournant qui entraîne la rotation du rotor, tandis que le courant de couple est responsable de la production du couple qui entraîne la charge.

En utilisant des calculateurs mathématiques complexes, la commande vectorielle mesure les grandeurs électriques et magnétiques du moteur et les convertit en vecteurs. Ces vecteurs sont ensuite utilisés pour réguler la vitesse et le couple du moteur, en ajustant la fréquence et l'amplitude du courant d'entrée (Figure 42).

La commande vectorielle permet une régulation précise de la vitesse et du couple des moteurs, ce qui la rend très utile dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les machines-outils, les ascenseurs, les systèmes de ventilation et de climatisation, et les véhicules électriques.

La base de cette commande consiste à assimiler la machine synchrone à rotor bobiné à une machine à courant continu (à excitation séparée), ce qui permet d'améliorer le comportement dynamique.

Le développement de composants de haute puissance a permis le passage de l'alimentation électrique des moteurs synchrones avec des onduleurs de source de tension (VSI) et leur utilisation permet de segmenter la puissance, améliorant ainsi la commutation de ces composants de puissance. De plus, pour les basses et moyennes puissances, l'alimentation de ces machines est

généralement assurée par des onduleurs à deux niveaux, cependant, pour les hautes puissances, ces machines nécessitent souvent des onduleurs multi-niveaux.

Sinon, la difficulté de contrôler ces machines réside dans le fait que le modèle mathématique du système est non linéaire, multi variable et hautement couplé en raison de l'existence d'un fort couplage entre le flux de rotor et le couple électromagnétique]. Pour les machines synchrones à pôles lisses, le découplage en fonctionnement à couple optimal est effectué pour le contrôle vectoriel en imposant  $I_d=0$  [15].

L'objectif est de réaliser un découplage entre le flux et le couple électromagnétique de la machine synchrone à pôles saillants, en introduisant une commande découplée optimale. Cette dernière est obtenue en imposant par le biais de la composante directe  $i_d=0$  et un fonctionnement à flux constant et à couple électromagnétique proportionnel aux composantes en quadrature du courant statorique. Ceci permettra de concrétiser un réglage de vitesse dans le cas d'une alimentation par MLI avec une stratégie de contrôle à hystérésis du courant[16].

$$C_e^* = \frac{3}{2}P (\varphi_f I_q^* + L_{\alpha} I_{\alpha} I_q^* - L_{\beta} I_{\beta} I_{\alpha}) \quad (26)$$

$$\begin{cases} V_d^* = R I_{\alpha} + L_{\alpha} \frac{dI_{\alpha}}{dt} - \omega^* L_q I_q^* \\ V_q^* = R I_q^* + L_{\beta} \frac{dI_{\beta}}{dt} + \omega^* (L_{\alpha} I_{\alpha} + \varphi_f) \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} V_d^* = -\omega^* L_q I_q^* \\ V_q^* = R I_q^* + \omega^* \varphi_f \end{cases} \quad (28)$$

$$I_q^* = C_e^* \left( \frac{2}{3P\varphi_f} \right) \quad (29)$$

$X^*$  : Veut dire une valeur de référence de X

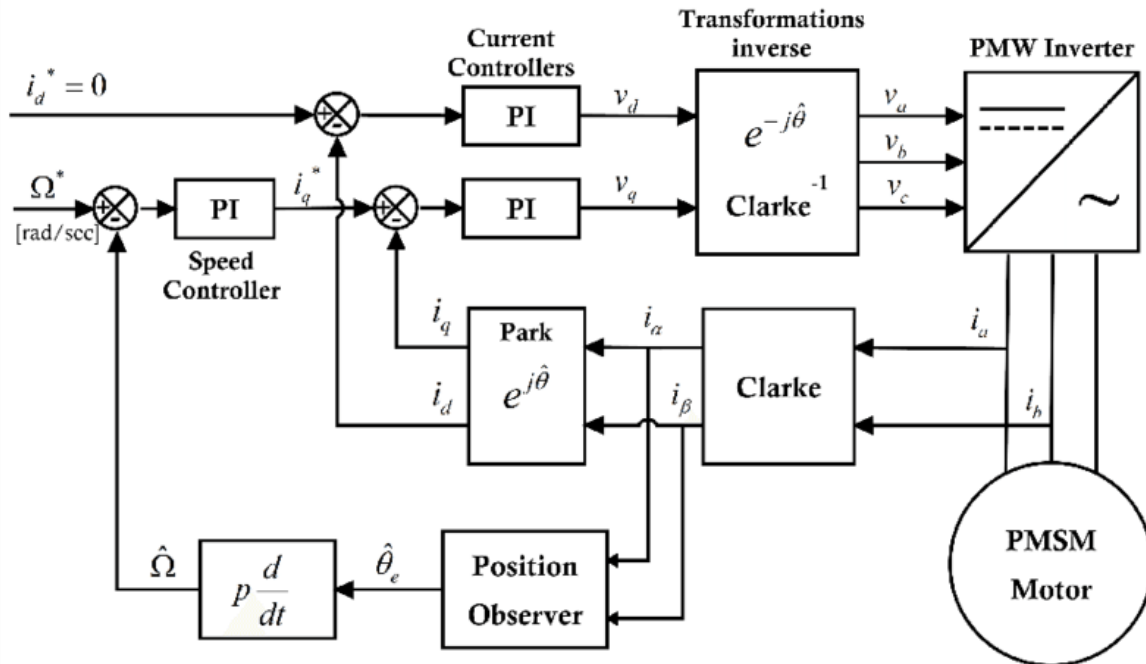


Figure 42 : Schéma d'une commande vectorielle d'un moteur synchrone à aimants permanents

### 3.7 Simulation Matlab

#### 3.7.1 Simulation : Machine synchrone a aimants permanents :

Dans cette partie, on va travailler avec les paramètres réels des moteurs synchrones utilisées dans la formation, on les introduit dans Matlab :

```
Rs=4.2 ;
Ld=2.4e-3 ;
Lq=4.6e-3 ;
J=0.000025 ;
F=0.0014 ;
P=3 ;
Fie=0.54 ;
R=[Rs 0; 0 Rs ];
L=[Ld 0 ; 0 Lq];
PhiF=[0 ; Fie];
A=[0 -Lq ; Ld 0 ];
V=300 ;
f=3000 ;
T=[2/3 -1/3 -1/3 ; -1/3 2/3 -1/3 ; -1/3 -1/3 2/3] ;
```

En se basant sur l'équations (25), on a réalisé le model ci dessous de la machine :[17]

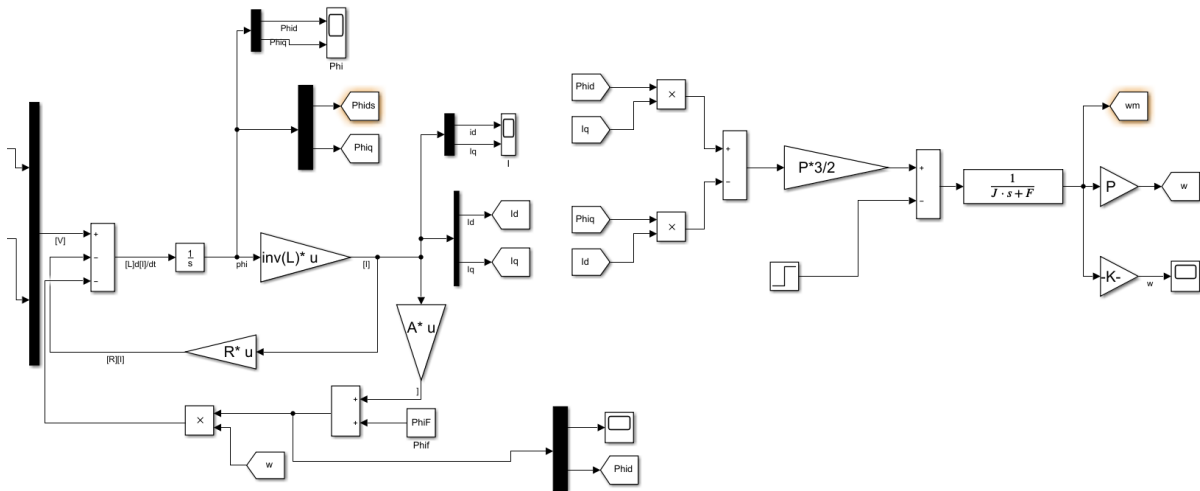


Figure 43: Schéma Simulink, model d'un moteur synchrone a aimant permanent

En se basant sur les équations (28) et (29) on a réalisé le schéma suivant :[17]

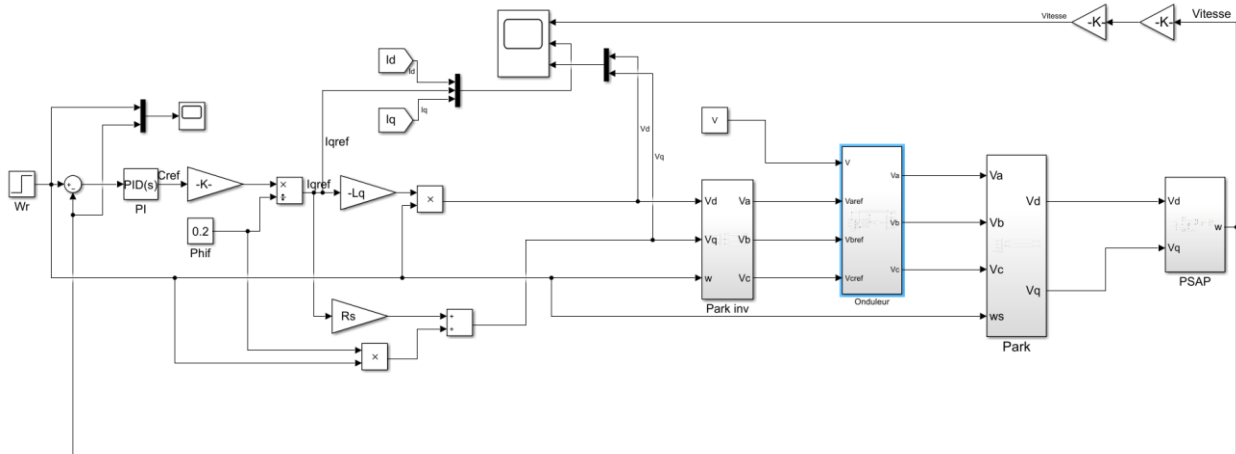


Figure 44 :Schema simulink d'une commande vectoriel

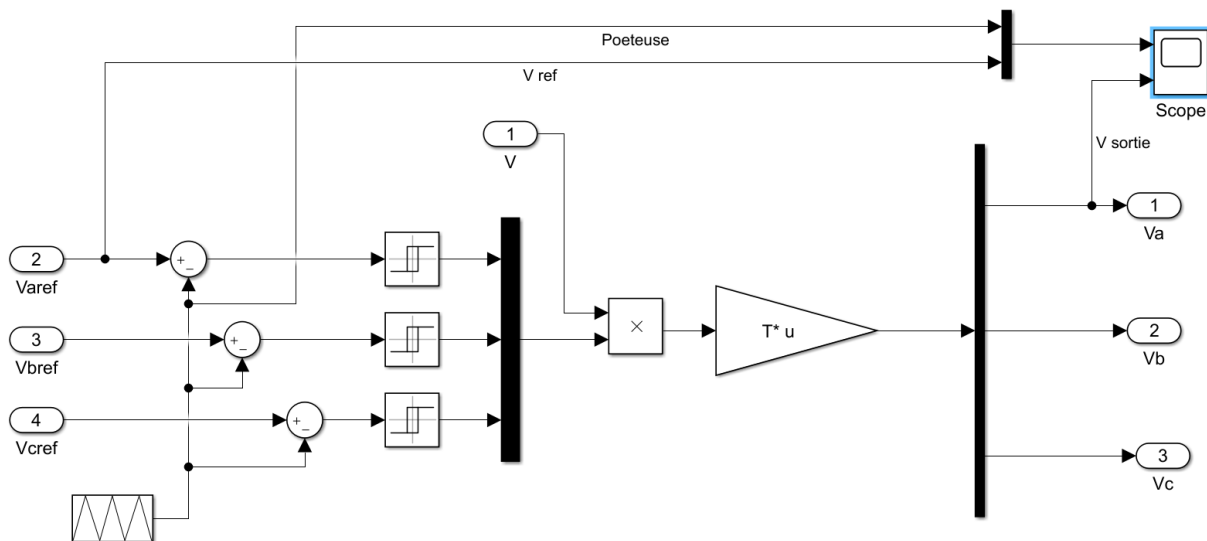


Figure 45 :sous-systeme,onduleur

Voici les resultats de simulation :

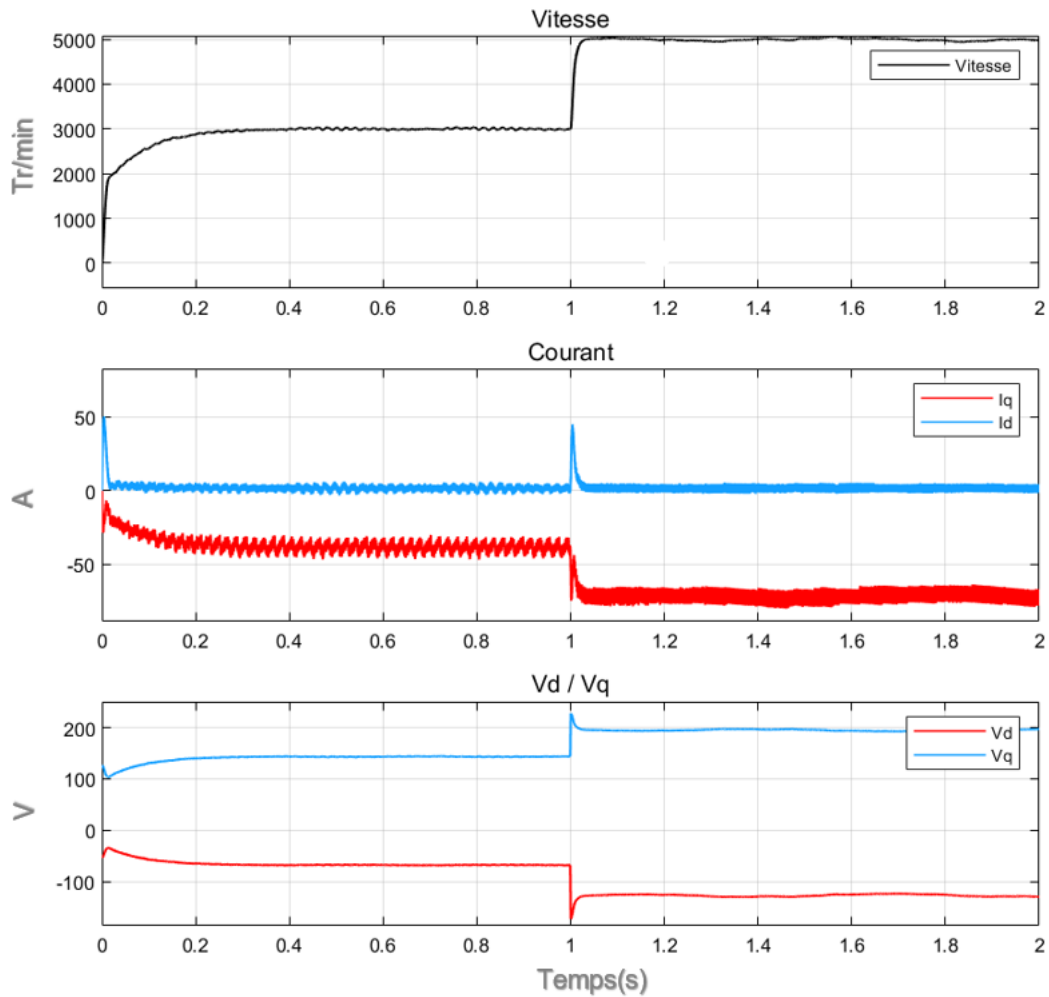


Figure 46:Resultats de simulation de la commande vectoriel

On remarque que le moteur maintient sa vitesse même durant les perturbations (couple résistant), La valeur moyenne du courant direct est nulle, et c'est ce qu'on veut pour faire le découplage et réduire le courant qui génère le flux magnétique.

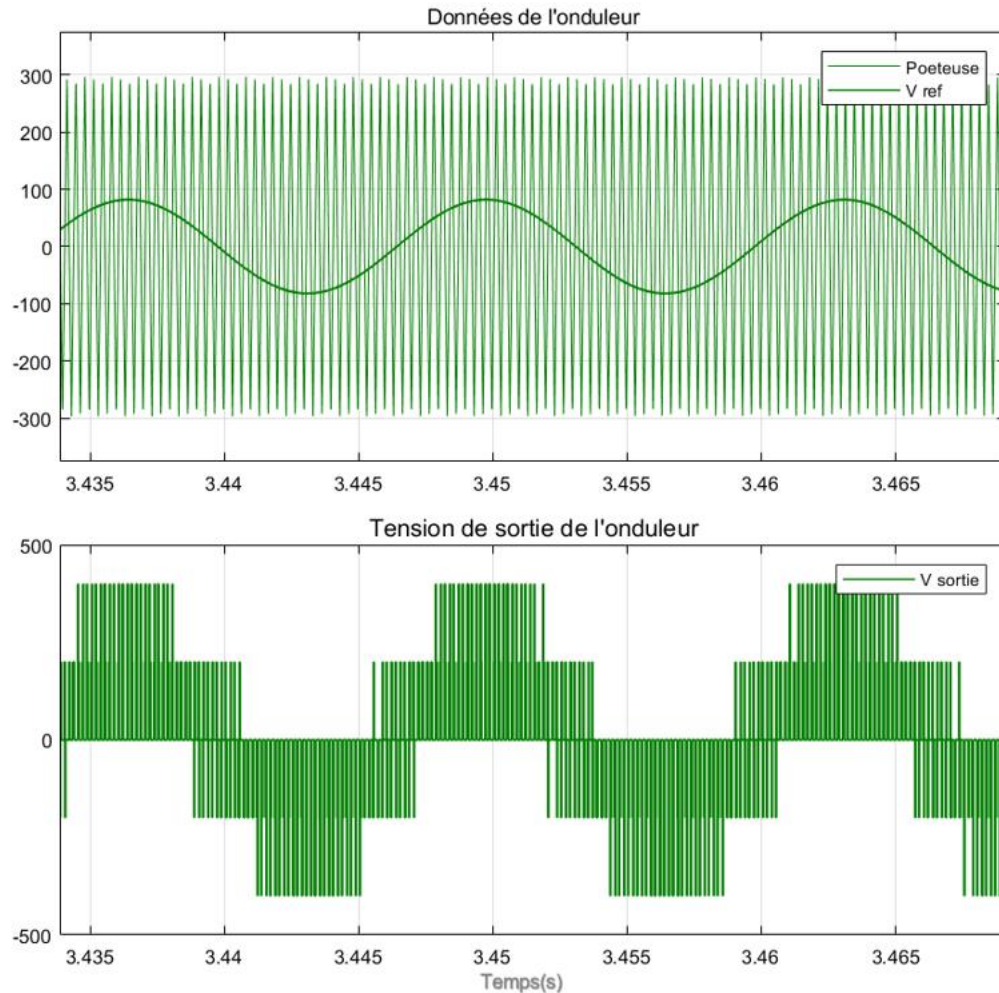


Figure 47: tension de l'onduleur résultante après la comparaison entre  $V_{ref}$  et  $V_{porteuse}$

Il est à noter que plus la fréquence de la porteuse est grande, plus la réponse va être meilleure. En réalité, la tension de sortie des MOTOR MODULES est sinusoïdale car il y a un filtre de tension après les onduleurs.

- Le lien vers les simulations Matlab se trouve dans l'annexe en dernier page.

# Chapitre 4 : Validation expérimentale

---

## **Introduction**

On rappelle que notre objectif est de programmer notre appareil pour qu'il puisse reproduire le même cycle de dosage que la machine remplisseuse utilisée dans l'usine de DANONE. Dans ce chapitre, nous allons détailler les étapes que nous avons suivies ainsi que la programmation que nous avons mise en place pour atteindre notre objectif.



## 4.1 Création du projet et configuration du matériel

Pour commencer il est nécessaire de créer un nouveau projet dans Simotion scout.

Après le démarrage de Simotion scout, on sélectionne nouveau projet dans la barre de menu et on saisit le nom et l'emplacement.

Après on insert l'appareil Simotion, pour ce faire on double-clic sur "Création d'un nouvel appareil" et on choisit notre type et version d'appareil (Dans notre cas c'est Simotion D425-2PN version 4.3).

On règle la fréquence d'horloge pour la communication entre Simotion RT et Sinamics-integrated (période de 2ms par exemple).

On insère des modules tel que le CBE30 ou ET200 s'il y a puis on configure leurs adresse IP.

On ouvre l'outil 'NetPro' pour établir une connexion du PC (ou du PG) via Ethernet, puis on sélectionne une adresse IP pour le PC/PG (Figure 48).

On enregistre la configuration matérielle et on la charge dans l'appareil Simotion.

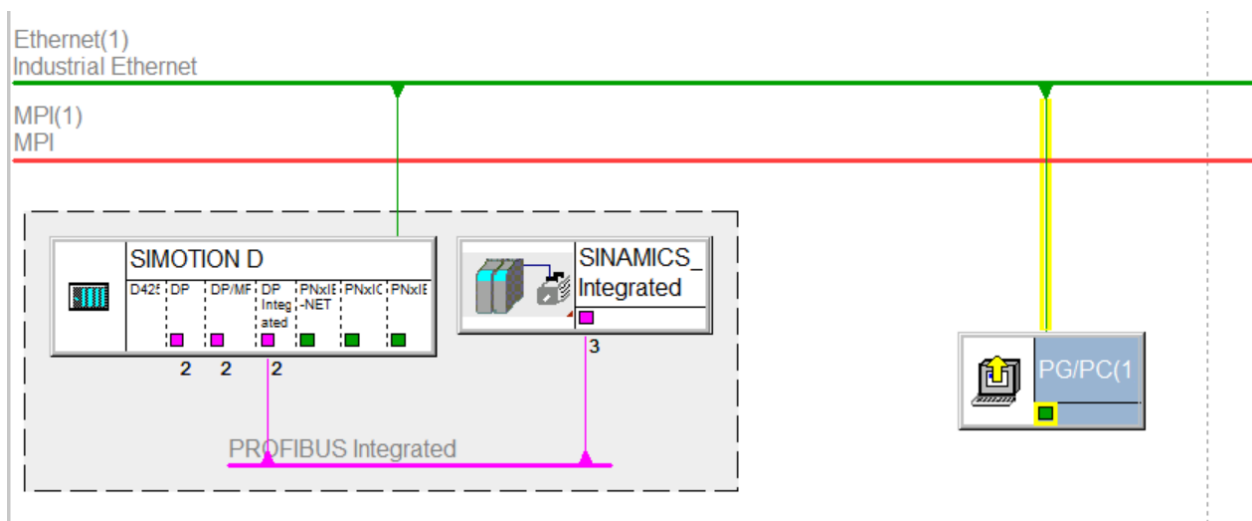


Figure 48: L'outil 'NetPro'

## 4.2 Configuration d'entraînement dans Sinamics

Après la connexion 'En ligne' aux appareils cible (Simotion), il est préférable de restaurer les réglages usines, puis on l'enregistre dans ROM, ensuite on commence la configuration.

Il existe deux types de configuration : Manuelle et automatique.

Dans la configuration manuelle en fait ces étapes (Figure 49):

**Configuration de l'alimentation :** on spécifie la forme de construction (Booksize, Blocksize ou châssis). On spécifie encore le mode de refroidissement, la tension et la référence du module d'alimentation.

**Configuration d'entraînement :** on introduit le type d'entraînement (Servo ou Vector), type de régulation (régulation de vitesse avec ou sans capteur, ou bien régulation du couple) et la référence du module de moteur.

**Configuration du moteur :** On sélectionne le type du moteur (synchrone ou asynchrone), ensuite on fait entrer sa référence, et on configure son farinage.

**Configuration d'encodeur :** on introduit le type d'encodeur (incrémentale ou absolu), et on spécifie sa résolution et son code.

**Configuration du télégramme :** On introduit le nombre de mots d'entrées (mesures) et de sorties (consignes) par cycle.

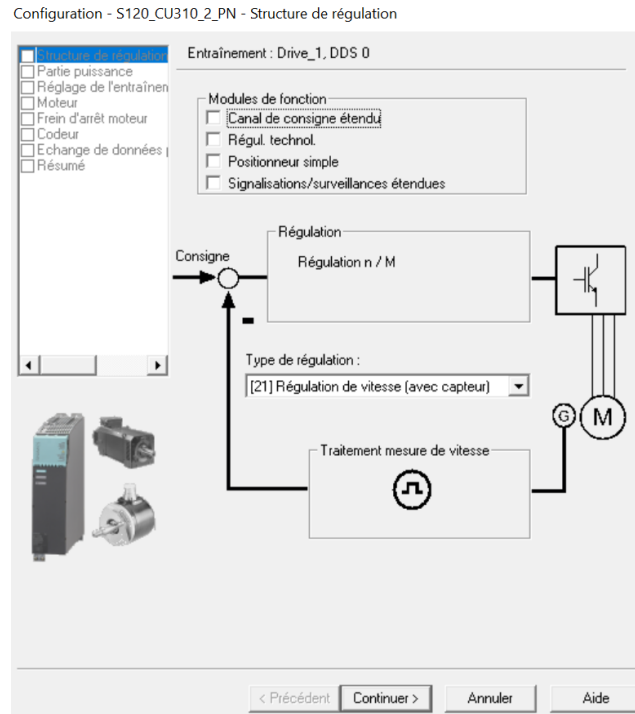


Figure 49 : Configuration d'entraînement

### **4.3 Pilotage par le tableau de commande**

Pour assurer qu'il n'y a pas de problèmes dans la configuration, on fait le pilotage par le tableau de commande, on va dans Entraînement > (On choisit le moteur souhaité) > Mise en service > Tableau de commande, puis on prend la maîtrise de commande, on coche le déblocage, après on saisit la valeur de consigne de vitesse et on appui sur le bouton marche. Le moteur commence à tourner, on peut dans ce cas visualiser tous les données de l'entraînement dans 'Liste pour experts'.

### **4.4 Mesure des paramètres du moteur**

À cette étape, nous cherchons à déterminer les paramètres du moteur. Dans Scout, nous sélectionnons le moteur souhaité, puis nous allons dans Mise en service > Mesure à l'arrêt/rotative. Il y a deux étapes de mesure : lors de la première, le moteur reste à l'arrêt, et lors de la seconde, il

tourne. L'activation de la mesure se fait à partir du tableau de commande. Une fois que la mesure est terminée, nous validons les résultats en appuyant sur « Appliquer les valeurs » (Figure 50).

mesure à l'arrêt/rotative

Paramètre	Texte du paramètre	Valeur	Unité
p352[0]	Résistance du câble	0.00000	Ohm
p353[0]	Moteur Inductance série	0.000	mH
p640[0]	Limite de courant	8.00	Aeff
p1909[0]	Identification des param. moteur Mot de commande	2700H	
p1959[0]	Mesure en rotation Configuration	0ee7H	

Etat : [0] Aucune mesure

Les paramètres suivants sont déterminés ou modifiés par l'identification des paramètres moteur :

Paramètre	Texte du paramètre	valeur actuelle	nouv. val.	Unité
p350[0]	Moteur Résistance stator à froid	4.22326	4.22326	Ohm
p356[0]	Moteur Inductance de fuite du stator	7.82003	7.82003	mH
p431[0]	Offset de l'angle de commutation	0.00	0.00	°
p408[0]	Capteur rotatif Nombre de traits	512	605	
p410[0]	Capteur Inversion Mesure	0000H	0000H	
p1715[0]	Régulateur de courant Gain P	32.827	32.827	V/A
p1717[0]	Régulateur de courant Temps d'intégration	2.00	2.00	ms

Figure 50 : Mesure des paramètres du moteur

## 4.5 Optimisation des régulateurs

### 4.5.1 Régulateurs de Sinamics

#### 4.5.1.1 Régulation manuelle

On peut optimiser les Correcteurs PI de courant (Figure 51) et de vitesse (Figure 52) manuellement, pour ce faire il faut commencer par le réglage de la composante proportionnel  $K_p$ , la composante I doit être négligeable pour permettre d'identifier l'effet de la composante P, donc on fixe  $T_i$  à une grande valeur.

On choisit une faible première valeur du gain  $K_p$  et on introduit une consigne d'un échelon et on observe la réponse, si la réponse est encore lente on augmente  $K_p$  et si la réponse commence à osciller on le réduit jusqu'à atteindre une réponse optimale.

Pour optimiser la composante I, on réduit  $T_i$  graduellement jusqu'à ce que le premier dépassement soit inférieur à une valeur souhaitée (20% par exemple).

Cette régulation se trouve dans Commande/régulation > régulateur de vitesse (ou de courant).

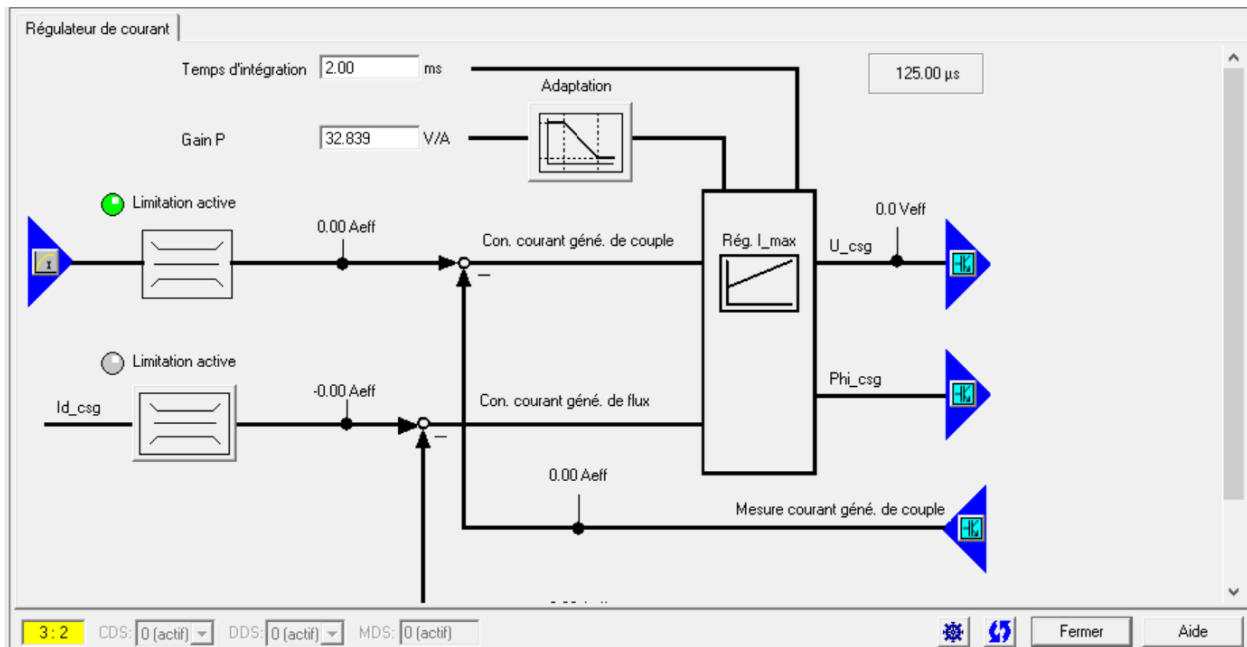


Figure 51: régulateur de courant

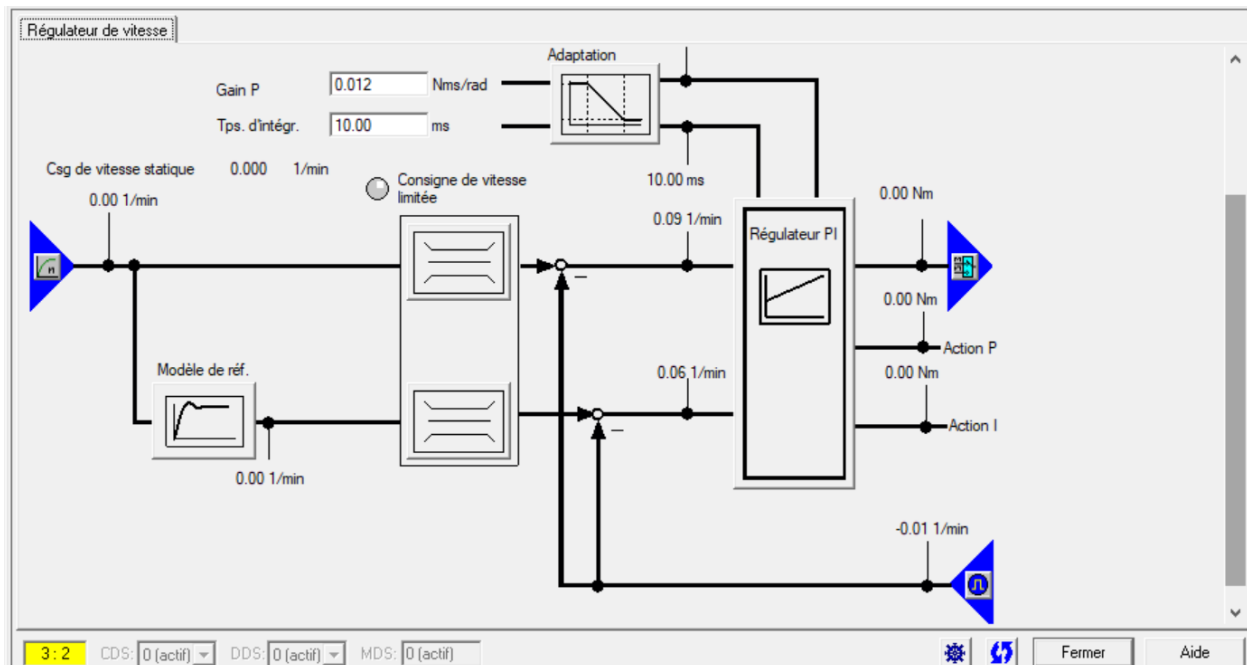


Figure 52: régulateur de vitesse

#### 4.5.1.2 Régulation automatique

Il est possible de régler les régulateurs de courant et de vitesse automatiquement après l'effectuation de la mesure des paramètres.

On sélectionne le moteur puis on entre dans Mise en service > Réglage automatique du régulateur, ensuite on prend la maîtrise de commande et on exécute les étapes comme le montre la figure 53.

Etape 1 : Le système mécanique est mesuré à des fréquences bases.

Étape 2 : Le système mécanique est mesuré à des fréquences élevés.

Étape 3 : Optimisation du régulateur de courant.

Étape 4 : Optimisation du régulateur de vitesse.

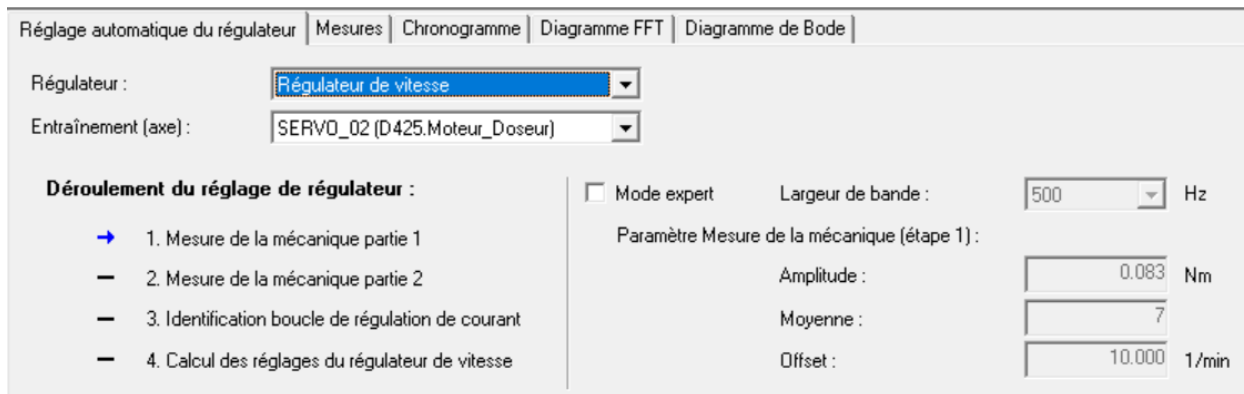


Figure 53: réglage automatique du régulateur

#### 4.5.1.3 Vérification avec la fonction de mesure

On vérifie la réponse du système dans Entraînement > Mise en service > Fonction de mesure > régulateur de courant (ou de vitesse) saut de consigne.

On saisit la durée de mesure et l'amplitude de consigne, après on prend la maîtrise de commande et on commence la mesure, enfin on vérifie le temps de réponse, le temps de montée, et le dépassement comme on peut le voir dans les figures figures 54, 55, 56.

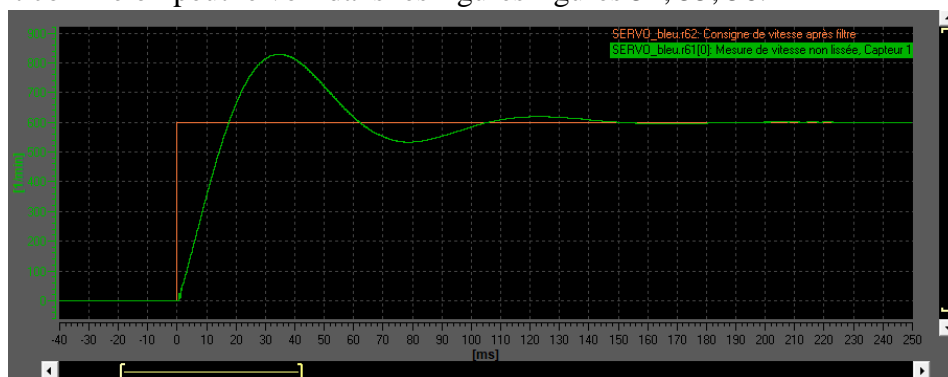


Figure 54: réponse à une consigne de vitesse de 600tr/min tel que:  $K_p=0.012$  ;  $T_i=10\text{ms}$

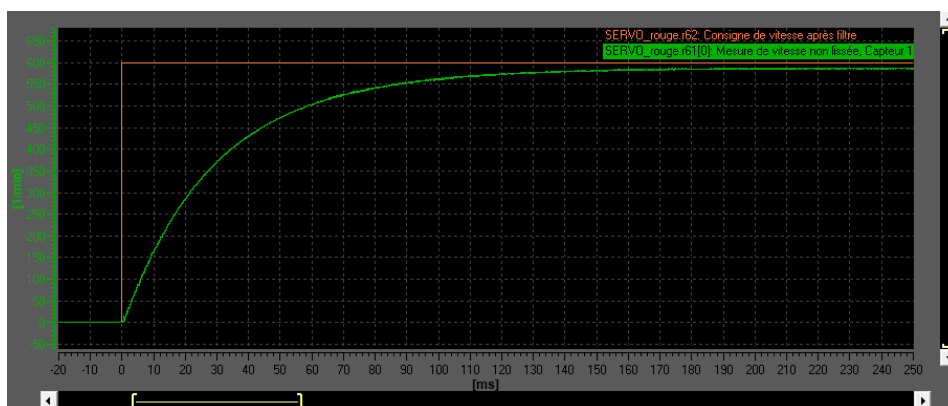


Figure 55: réponse à une consigne de vitesse de 600tr/min tel que:  $K_p=0.012$  ;  $T_i=1000\text{ms}$

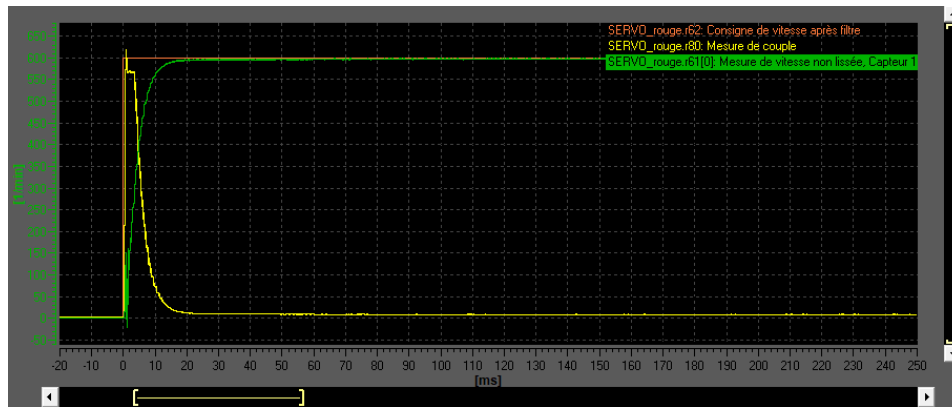


Figure 56: réponse à une consigne de vitesse de 600tr/min tel que:  $K_p=0.1$  ;  $T_i=1000\text{ms}$

On peut même visualiser la forme du courant et de tension de phase (Figure 57), et faire des transformations de Fourier (Figure 58), ainsi que tracer les composantes directes et quadratiques du courant (Figure 59):

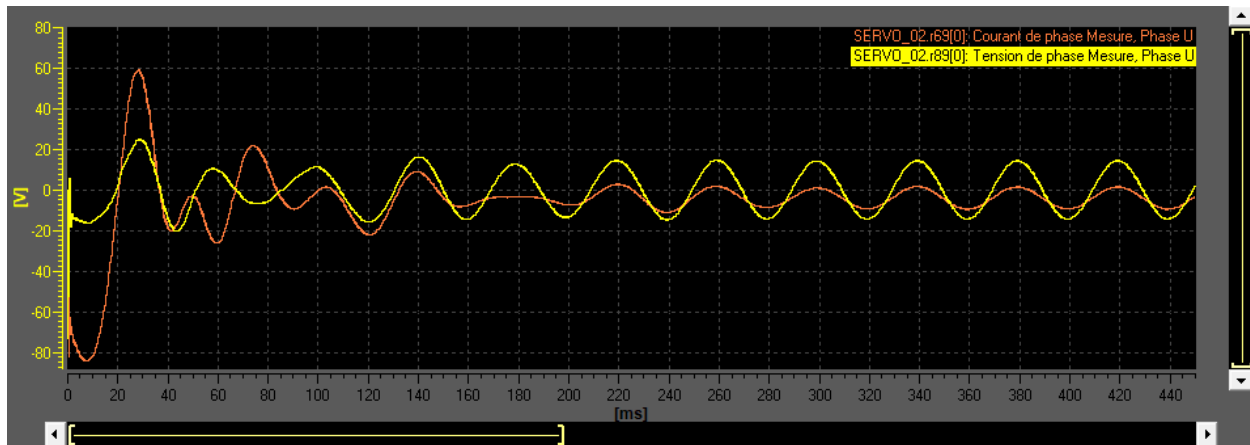


Figure 57: tension de phase et courant de phase lors d'un saut de consigne (vitesse=500tr/min)

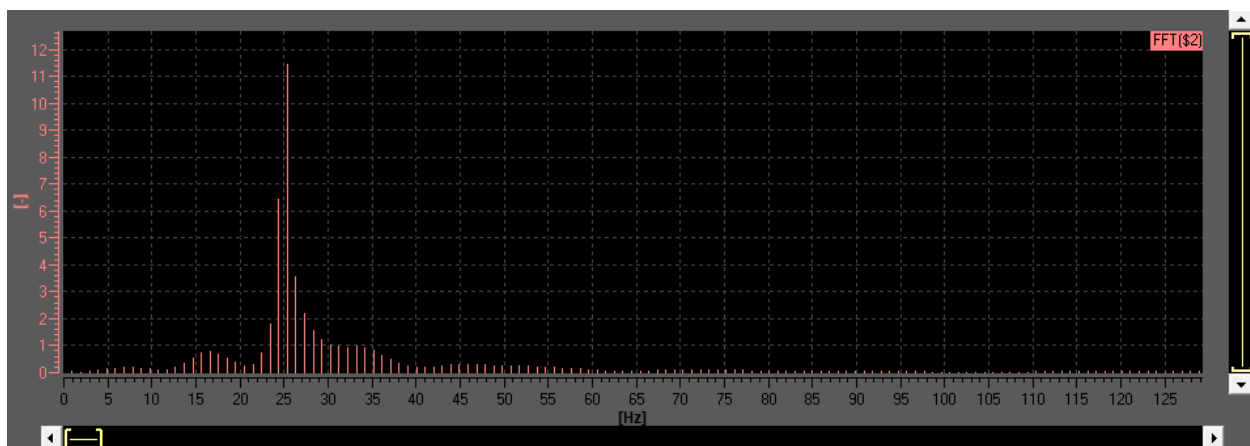


Figure 58: fast fourier transform (FFT) de la tension de phase

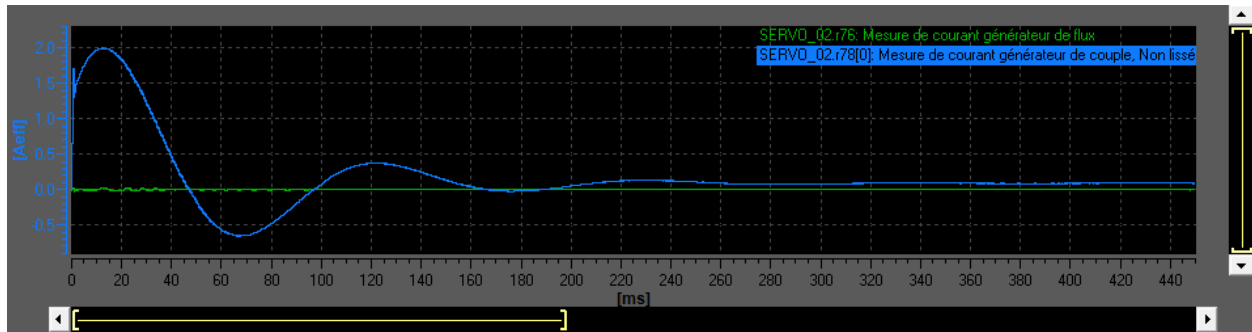


Figure 59: Courant direct (en bleu) et courant quadratique (en vert)

### 4.5.2 Configuration des axes

On passe en mode hors ligne et on sélectionne les réglages suivants pour nos axes :

- Nom d'axe
  - Technologie d'axe : régulation de vitesse + positionnement + synchronisme (si nécessaire)
  - type d'axe : Linéaire ou rotatif ; Electrique ou hydraulique ou virtuel
  - Configuration des unités
  - Affectation de l'entraînement de Simotion dans Sinamics
  - Vitesse maximale et nominale
  - Type d'encodeur (absolue ou incrémentale ainsi que le nombre de traits et de bits de données)
- Puis on enregistre et on compile le projet, on le charge dans le système cible, et dans ROM.

### 4.5.3 Régulateur de position de Simotion D

Dans cette régulation, nous sommes libres de choisir ou pas la commande anticipatrice et la fonction 'dynamic servo control'.

La commande anticipatrice est une méthode de commande utilisée pour améliorer la réponse d'un système en ajoutant une composante de commande qui anticipe les perturbations futures. Cette méthode consiste à mesurer la perturbation avant qu'elle n'atteigne le système, puis à ajouter une commande prédictive pour compenser cette perturbation avant même qu'elle ne soit détectée par le système.

'Dynamic Servo Control' (DSC) est une technique qui consiste à régler dynamiquement les paramètres de commande du système en fonction des changements de charge et de vitesse, afin d'obtenir une réponse rapide et précise aux perturbations du système.

Dans un premier temps, il faut désactiver la commande anticipatrice et la DSC pour régler le gain P de boucle de position, une fois le gain est optimisé, on peut réactiver la commande anticipatrice et la DSC.

Voici les étapes suivies pour régler le gain de boucle de position :

- Exécuter un programme répétitif sur l'axe que l'on veut optimiser, par exemple : positionner un axe à 200mm puis faire une pause de 100ms, puis le positionner à -200mm et ainsi de suite.
- Lancer l'outil trace et on sélectionne notre appareil 'D425'.
- Sélectionner les signaux : 'consigne de position' et 'mesure de position' et 'écart de trainage'.
- Démarrer la fonction trace.
- Régler le gain de boucle en visualisant l'écart entre la valeur de consigne et mesurée.
- Enregistrement du gain dans ROM

Les résultats de la régulation de position sont illustrés dans les deux figures ci-dessous :

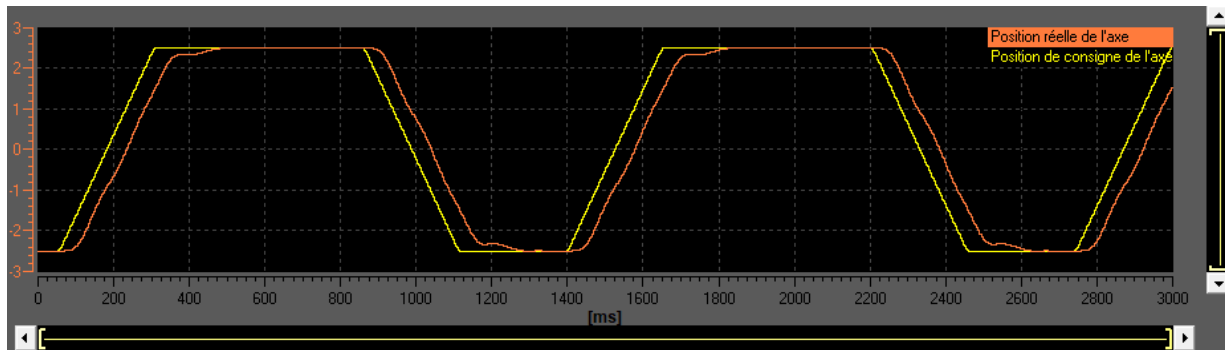


Figure 60: trace du positionnement avant l'optimisation

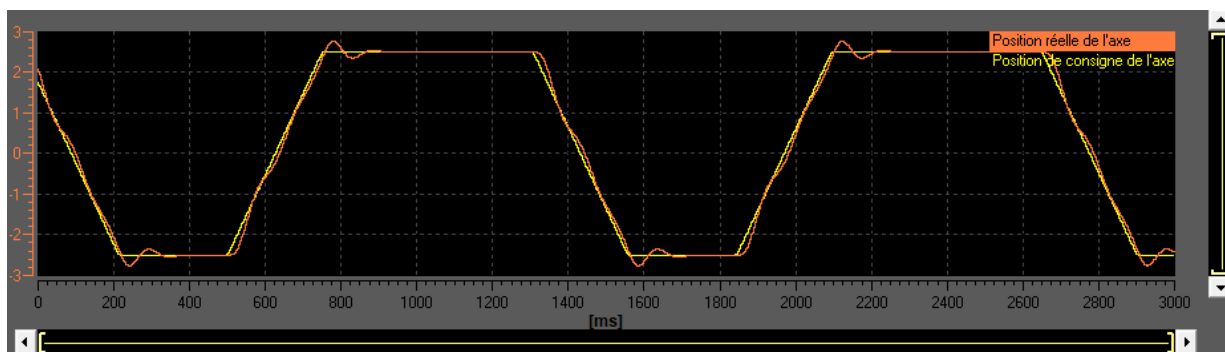


Figure 61: trace du positionnement après l'optimisation

#### 4.5.3.1 Test de circularité

Pour effectuer un test de circularité (Figure 62), on peut demander au système de contrôle de mouvement de générer une trajectoire circulaire précise. Ensuite, les capteurs de position mesurent en continu la position réelle de l'axe de mouvement pendant son déplacement circulaire. Les données mesurées sont comparées à la trajectoire théorique pour évaluer la précision du mouvement.

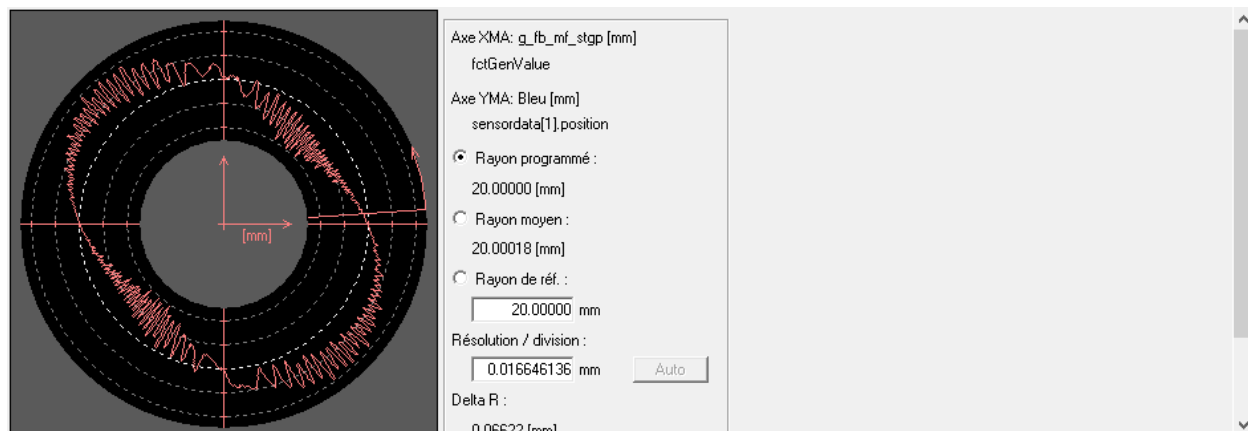


Figure 62: test de circularité



## 4.6 Référencement des axes

Le référencement des axes dépend du type d'encodeur liée au moteur.

### 4.6.1 Référencement d'un axe possédant un codeur incrémental

L'axe qui possède un codeur incrémental doit être référencé après chaque mise sous tension de l'appareil (Figure 64).

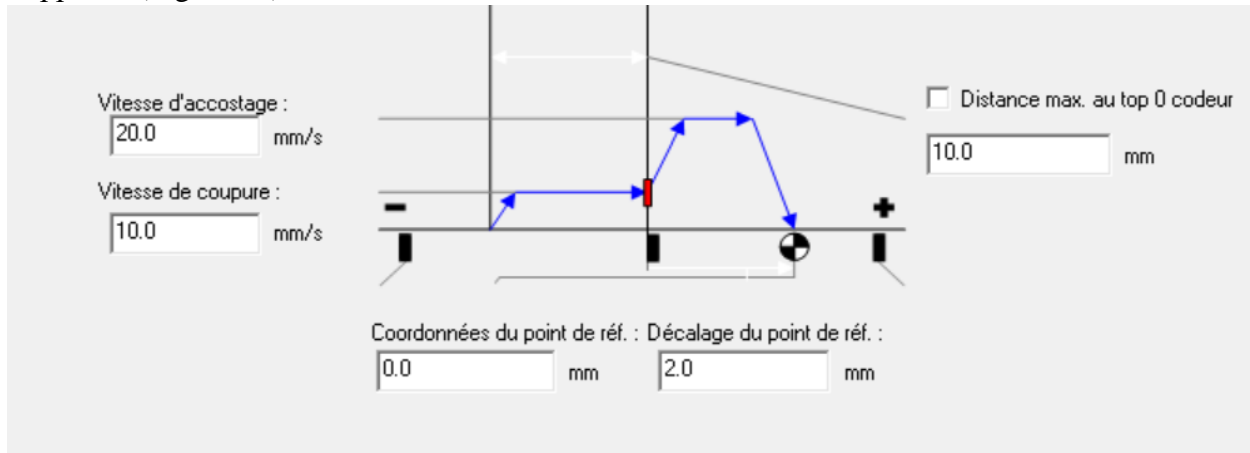


Figure 63: referencement d'axe portant un codeur incrémentale

Exécution de ce référencement :

- On crée un programme MCC (Figure 64) en activant 'Etat du programme' et 'Mode pas à pas' pour qu'il se répète en ligne.
- On ajoute une commande 'attendre le franc montant' d'une entrée qu'on choisit, et en série avec elle on ajoute la commande 'référencer l'axe' avec le réglage 'référencement actif'
- On compile le programme.
- On affecte le programme dans un MotionTask que l'on choisit, il doit être lancé automatiquement après le démarrage.
- On exécute le programme
- On règle le décalage du point de référence puis on lance le signal qu'on a choisi jusqu'à ce que le point 0 du disk point exactement vers le haut.
- On enregistre les données dans le système cible et dans le pc.

Après l'enregistrement dans ROM, il ne sera pas nécessaire qu'on répète ce travail à chaque fois, il se suffira juste d'appeler un programme MCC qui met à zéro les axes.

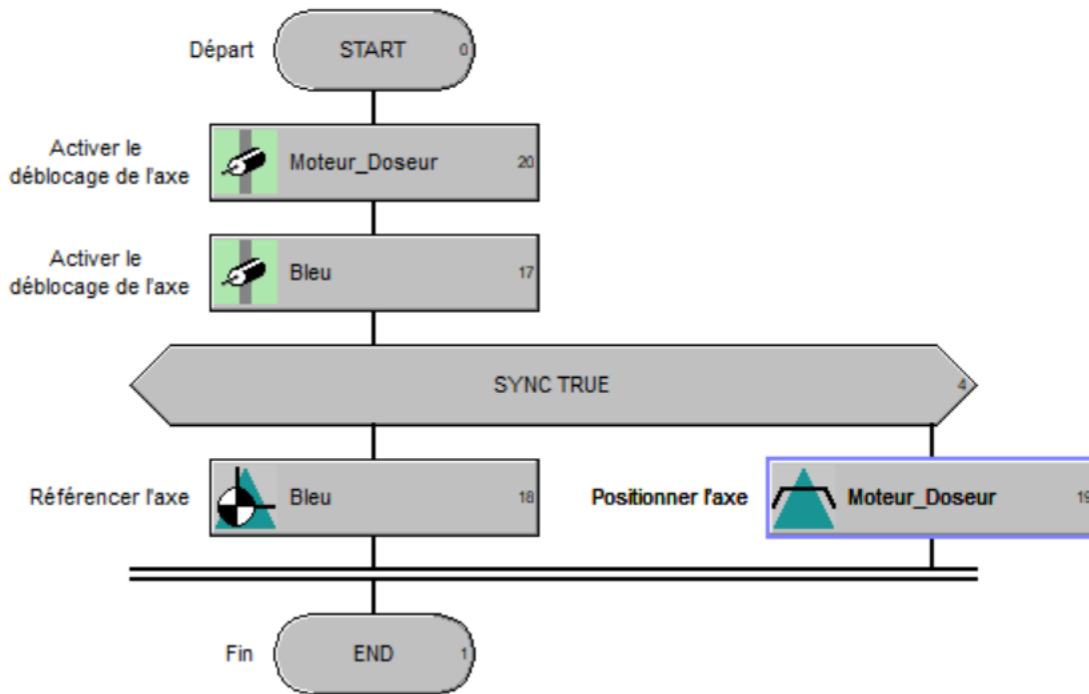


Figure 64: Programme MCC, mise à zéro des axes

L'exécution de ce programme met les axes 'Bleu' et 'Moteur Doseur' à la position zéro qu'on définit.

#### 4.6.2 Référencement d'un axe possédant un codeur absolu

Le référencement d'un axe possédant un codeur absolu peut être effectuée par les étapes précédentes ou par le tableau de commande.

Le référencement par le tableau de commande est simple, il faut déplacer l'axe jusqu'à atteindre le point 0, puis on affecte le référencement.

### 4.7 Systeme executif :

L'automatisation des machines implique souvent l'exécution simultanée de processus tels que le déplacement des axes. Dans un tel scénario, il est nécessaire d'avoir un système de commande multitâches (Figure 65).

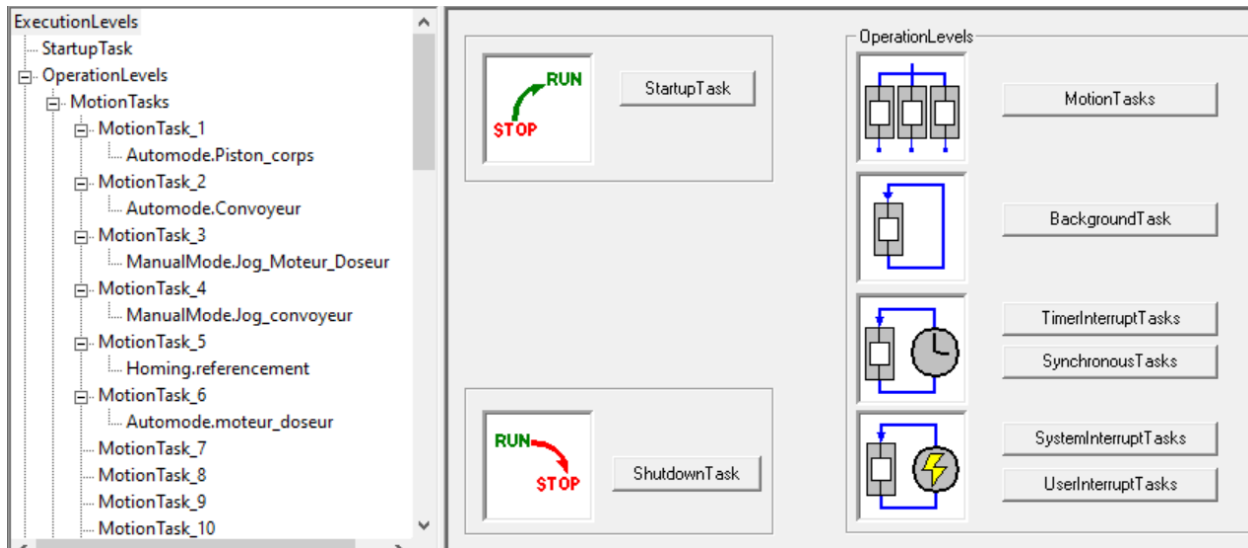


Figure 65: Système exécutif

#### 4.7.1.1 *StartupTasks/ ShutdownTasks*

La Startup Task est exécutée une seule fois au passage de l'état STOP ou STOP U à l'état RUN. C'est une tâche d'initialisation. La Shutdown Task est appelée au passage de l'état RUN à l'état STOP ou STOP U.

#### 4.7.1.2 *BackgroundTasks*

Cette tâche est appelée cycliquement. Si des programmes sont exécutés au cours de cette tâche, elle redémarre automatiquement. Elle permet d'exécuter les opérations classiques de verrouillage d'un API.

#### 4.7.1.3 *MotionTasks*

Il s'agit de tâches lancées par exemple par un programme utilisateur cyclique et qui ne sont exécutées qu'une seule fois.

#### 4.7.1.4 *UserinterruptTasks*

Ces tâches sont déclenchées par un événement et exécutées une seule fois. Elles permettent de réagir à des événements définis par l'utilisateur.

#### 4.7.1.5 *SysteminterruptTasks*

Ces tâches sont déclenchées par des événements du système comme des erreurs ou des alarmes et sont exécutées une seule fois.

#### 4.7.1.6 *TimerinterruptTasks*

Ces tâches sont lancées et traitées périodiquement dans des intervalles de temps fixes. Elles permettent de réaliser par exemple des tâches de régulation exigeant une référence temporelle précise. Il existe des tâches supplémentaires pour la régulation de température avec le package technologique.

## 4.8 Présentation des taches du projet

Lorsque les commutateurs 0 et 1 (voir les figures 66 et 67) sont positionnés sur ON, la LED 8 "Led\_ON" s'allume et tous les axes se débloquent. De plus, ils se déplacent jusqu'à atteindre la position 0, ce que nous appelons "homing".

Le sélecteur 2 sert à sélectionner le mode manuel ou automatique, tandis que le sélecteur 3 sert à confirmer notre choix de mode et à démarrer le mode manuel ou automatique.

Dans le cas du mode manuel, les sélecteurs 4 et 5 sont liés au moteur doseur. Le sélecteur 4 fait tourner le moteur dans le sens positif tandis que le sélecteur 5 le fait tourner dans le sens négatif. Les sélecteurs 6 et 7 sont liés au convoyeur. Le sélecteur 6 fait tourner le moteur dans le sens positif tandis que le sélecteur 7 le fait tourner dans le sens négatif.

Il est possible de ramener les axes à la position 0 en positionnant le sélecteur 15 sur ON.

Dans le cas du mode automatique, les axes "convoyeur", "moteur\_doseur" et "piston\_corps" se déplacent selon le cycle de dosage souhaité (Figure 68). De plus, les LED représentant les membranes des corps et des buses s'allument et s'éteignent selon le cycle d'ouverture et de fermeture des membranes. La LED 11 correspond aux membranes des buses et la LED 12 correspond aux membranes des corps.

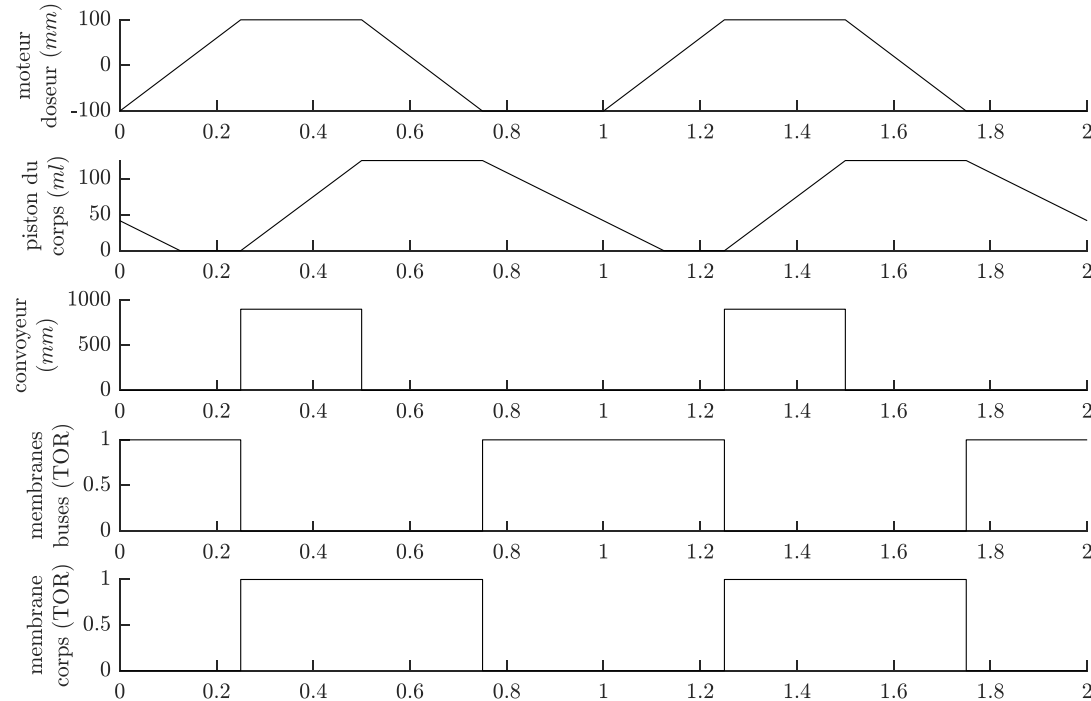


Figure 66: Cycle de dosage souhaité

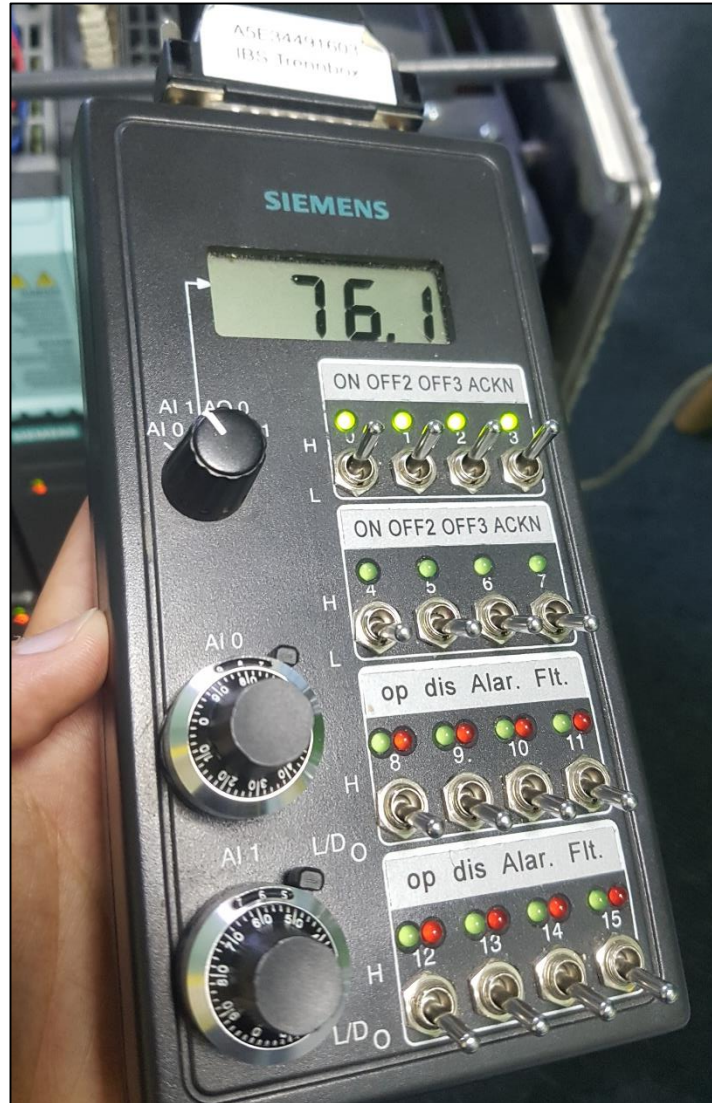


Figure 67:boite de commissionnement

0 IN : B_Marche	1 IN : B_Arret	2 IN : BP_M_A	3 IN : BP_Confir
4 IN : Jog_R_AV	5 IN : Jog_R_AR	6 IN : Jog_B_AV	7 IN : Jog_B_AR
8 OUT :LED_ON	9	10	11 OUT :Buse_membrane
12 OUT :Corps_membrane	13	14	15 IN : homing

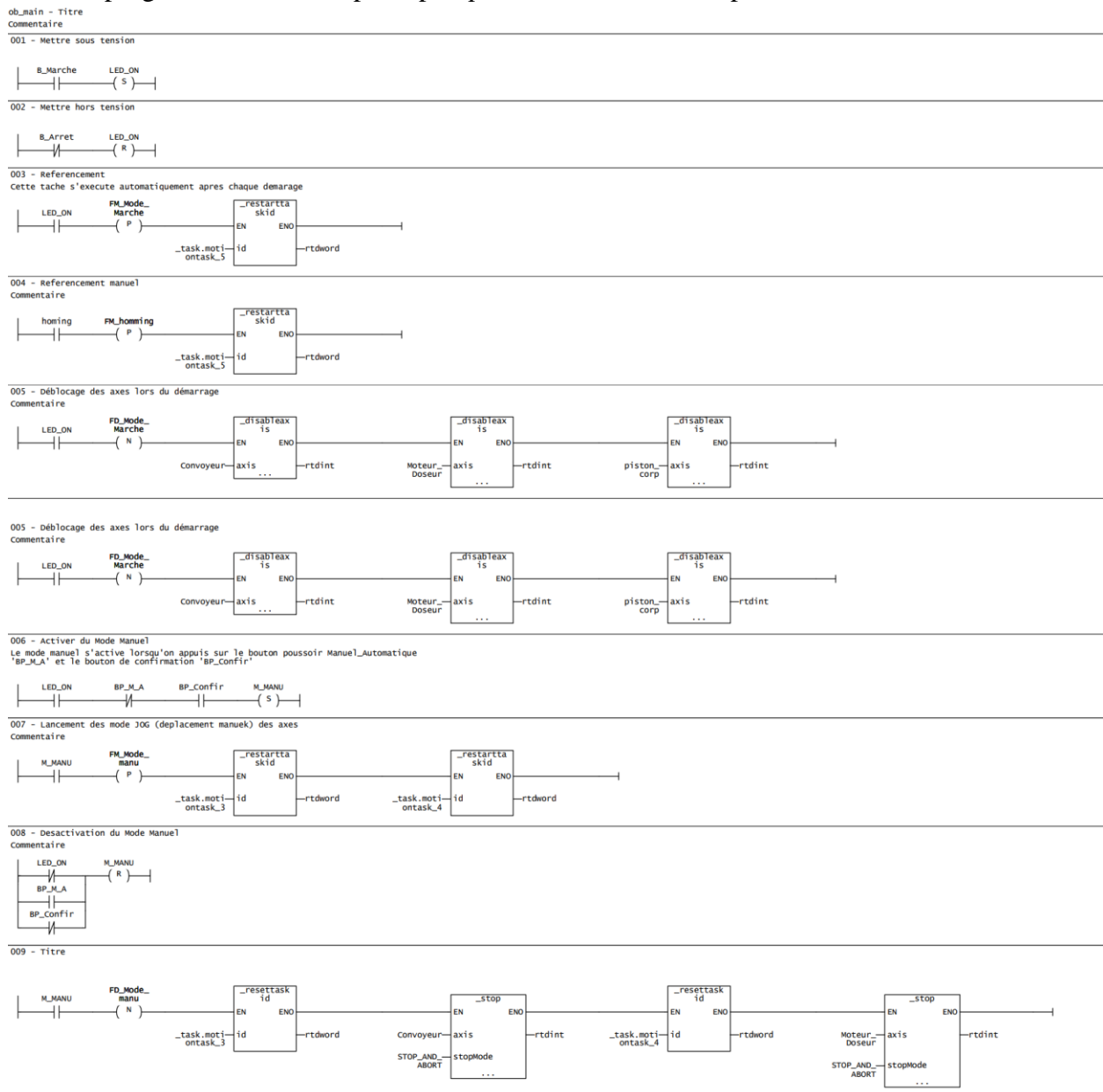
Figure 68:les entrées et les sorties de la boite de commissionnement

Le tableau ci-dessous illustre la répartition des taches utilisés dans le projet.

Motion Tasks	Motion Task 1 : Automode.Piton_coprs
	Motion Task 2 : Automode.Convoyeur
	Motion Task 3 : Manualmode.Jog_Moteur_Doseur
	Motion Task 4 : Manualmode.Jog_Convoyeur
	Motion Task 5 : Homing.referencement
	Motion Task 6 : Moteur_doseur
BackgroundTasks	Ob_main
SysteminterruptTasks	Fault_react

Tableau 6:Repartition des taches

Voici le programme Ob\_main principal qui s'exécute en arriere plans :



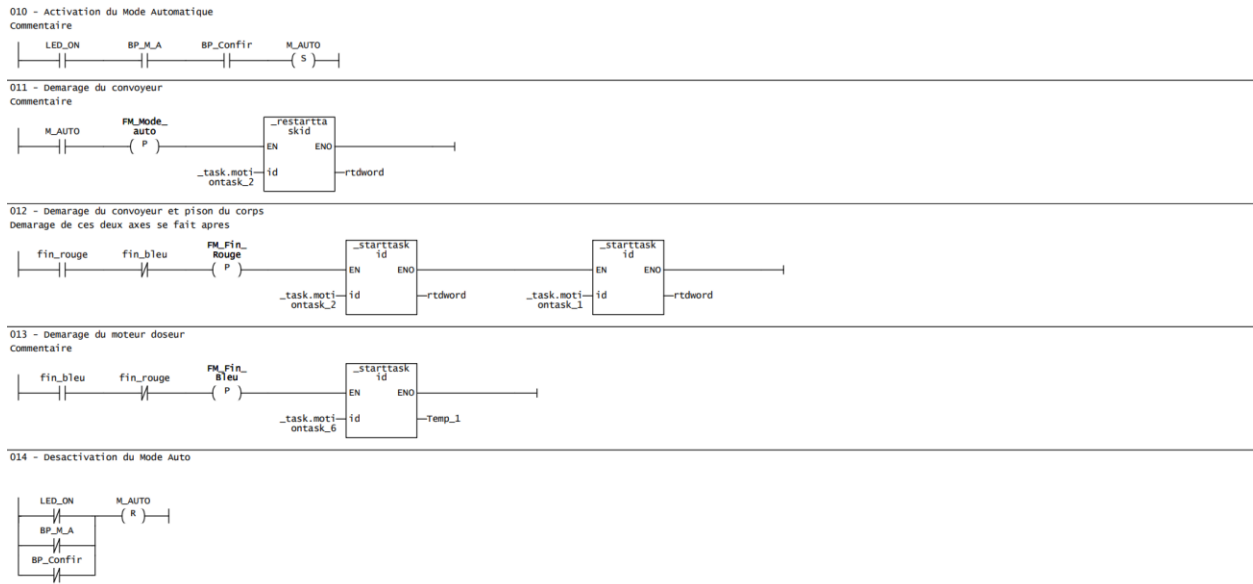


Figure 69: programme principale

Ces figures représentent les programmes de déplacement des axes réalisés :

Piston\_corps

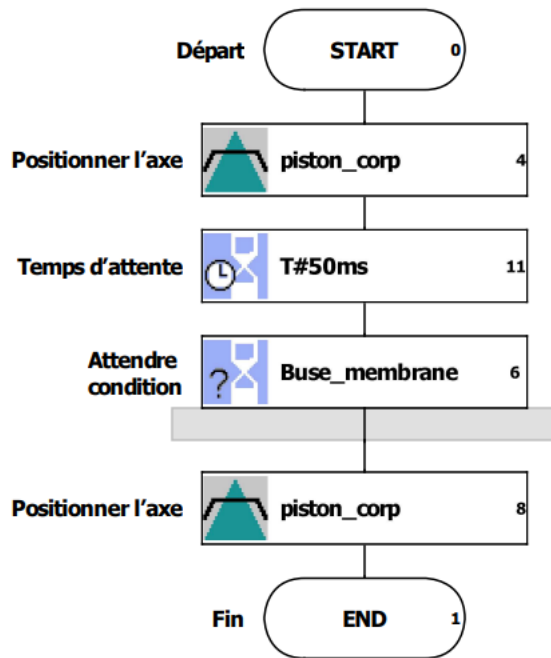


Figure 70: Automode.Piton\_coprs

Convoyeur

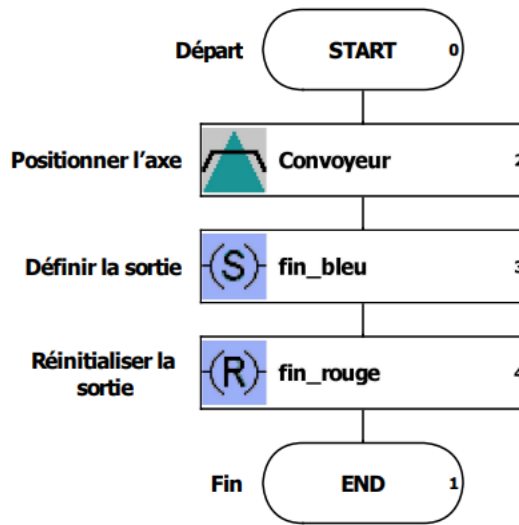


Figure 71:Automode.Convoyeur



moteur\_doseur

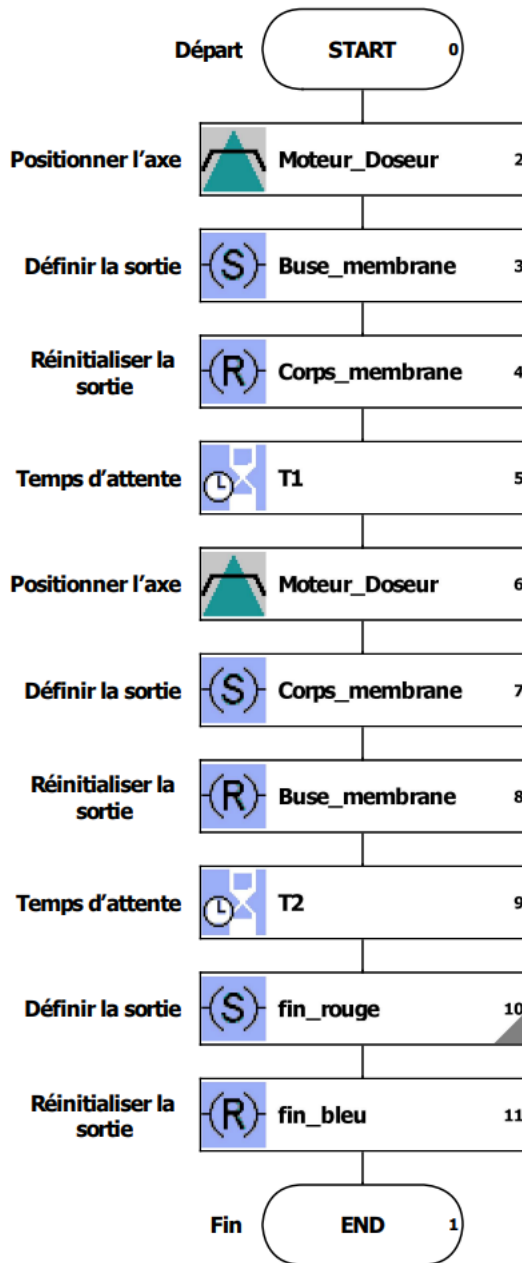


Figure 72:Automode.Moteur\_doseur

Fault\_react

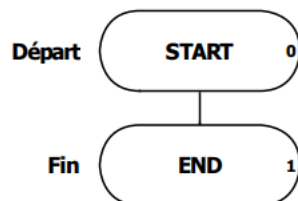


Figure 73:fault\_react

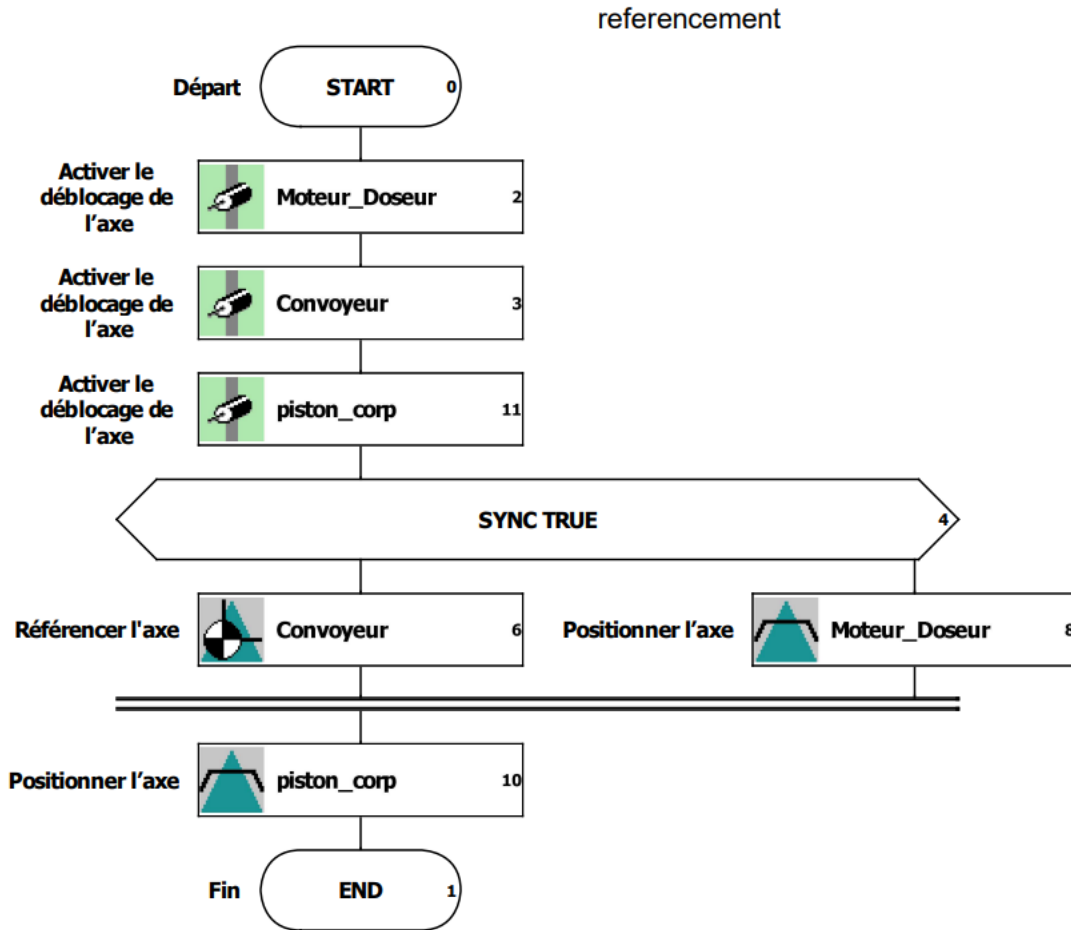


Figure 74:homming.referencement

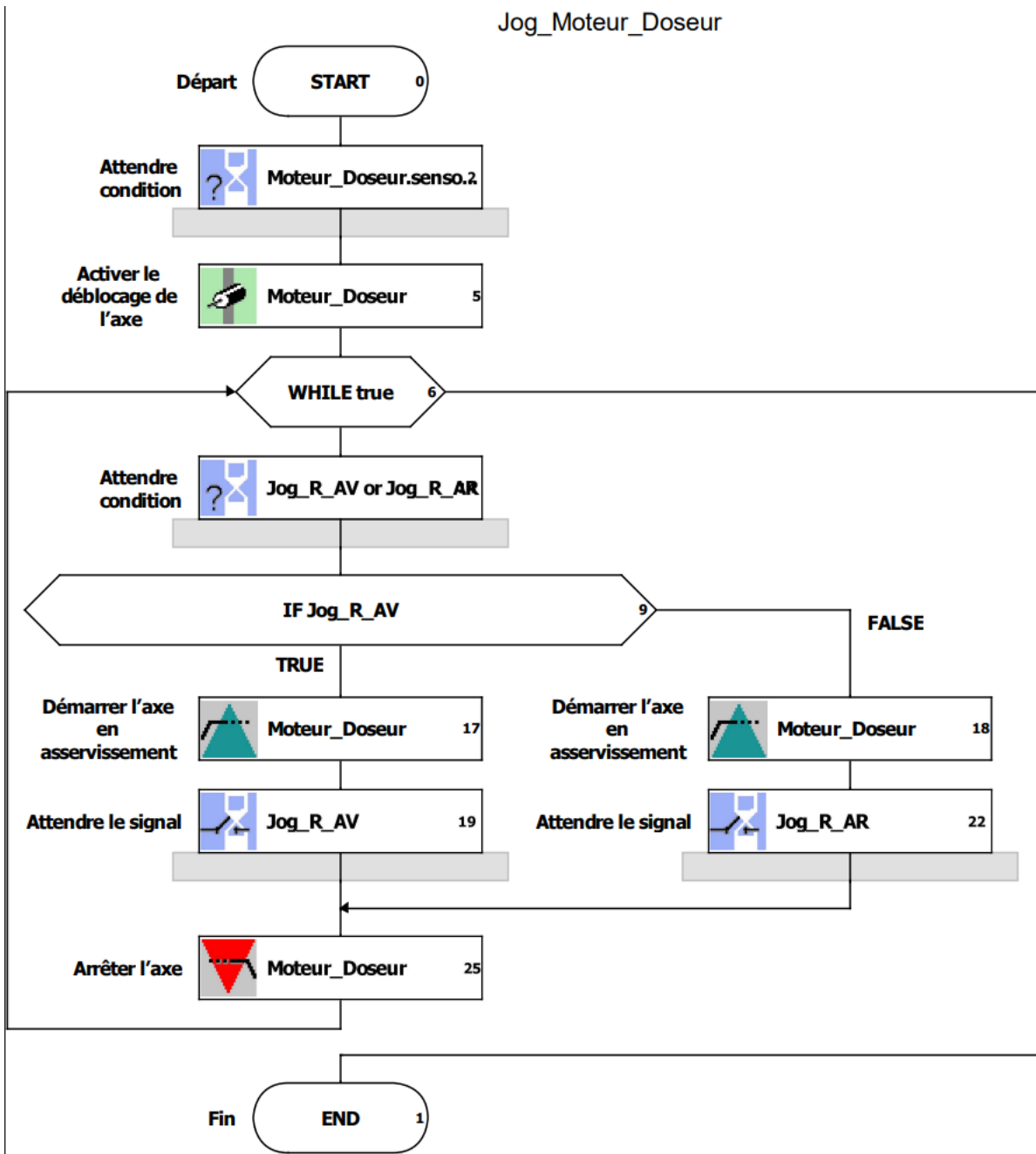


Figure 75:Manualmode.Jog\_Moteur\_Doseur

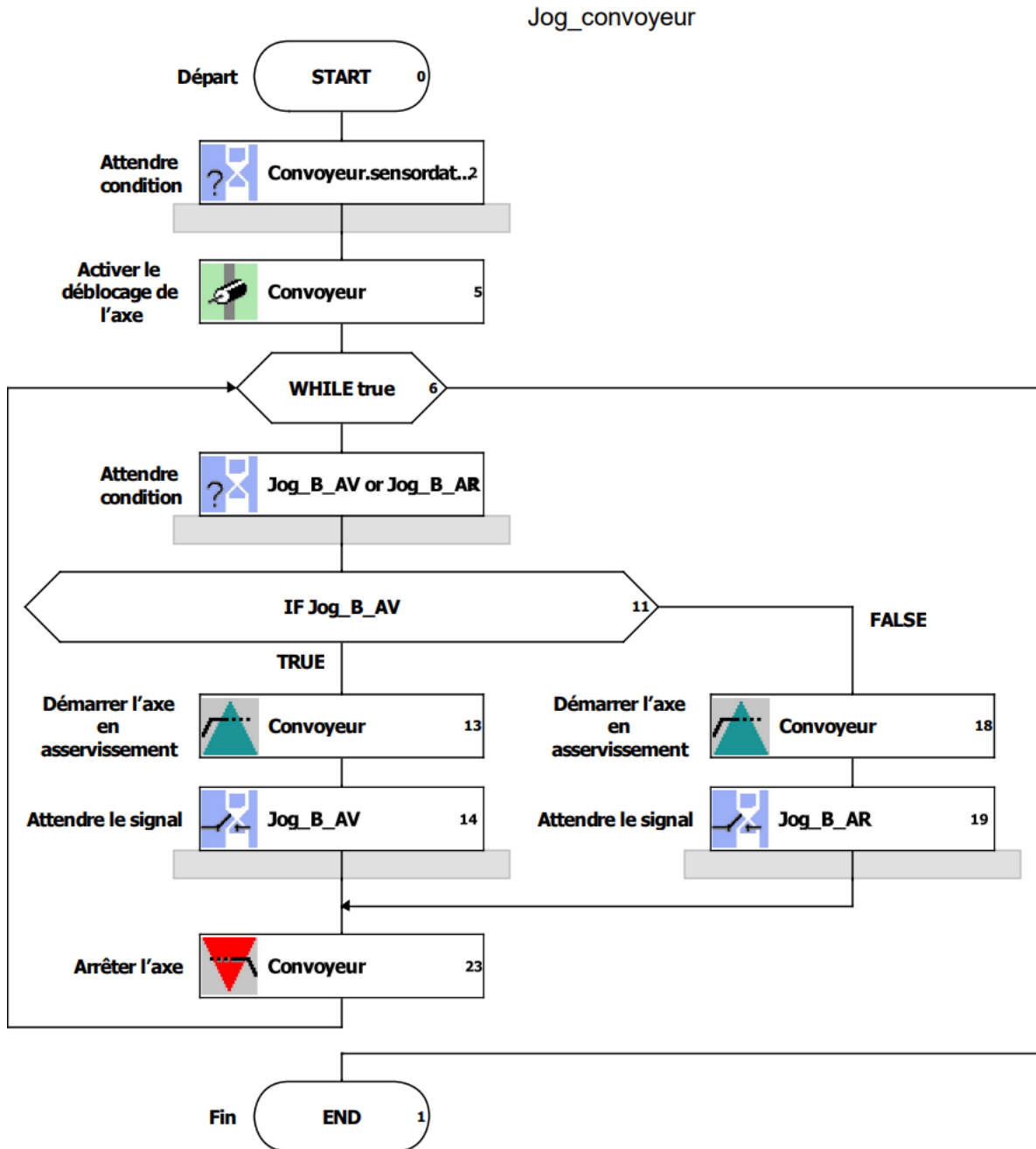


Figure 76:Manualmode.Jog\_Convoyeur

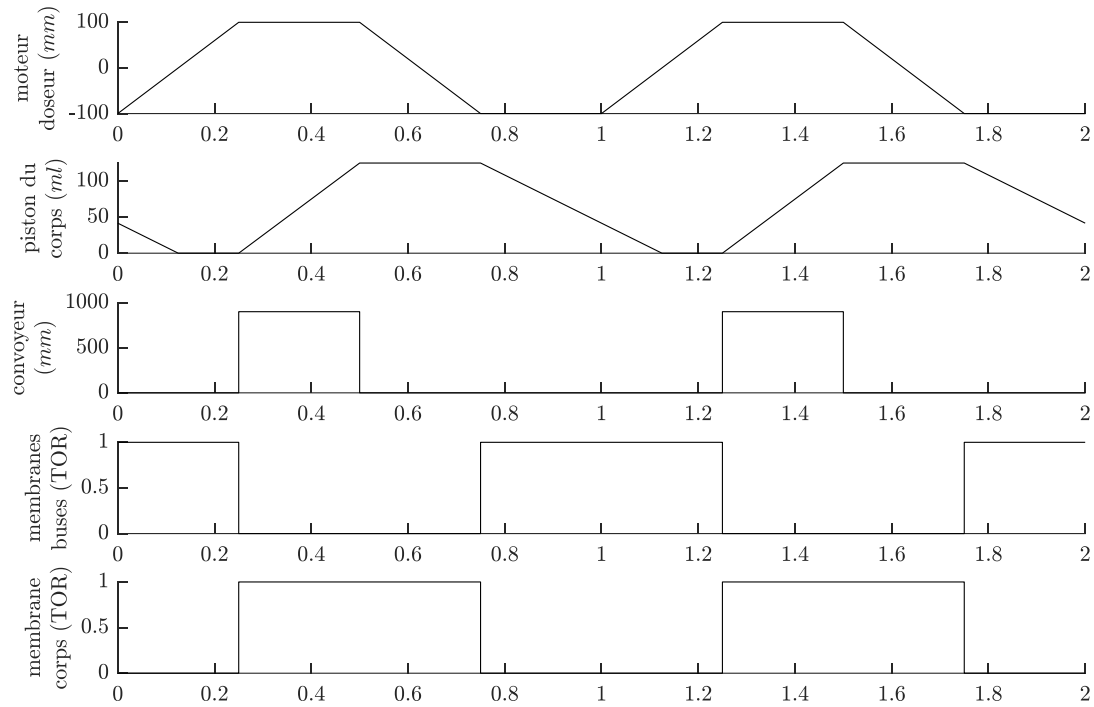


Figure 77: cycle de dosage souhaité

Voici les cycles expérimentaux réalisés :

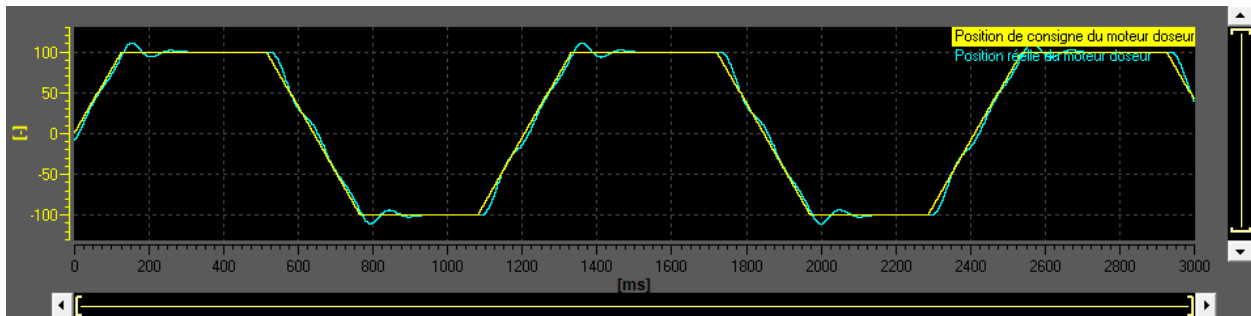


Figure 78: position réel et de consigne du moteur doseur

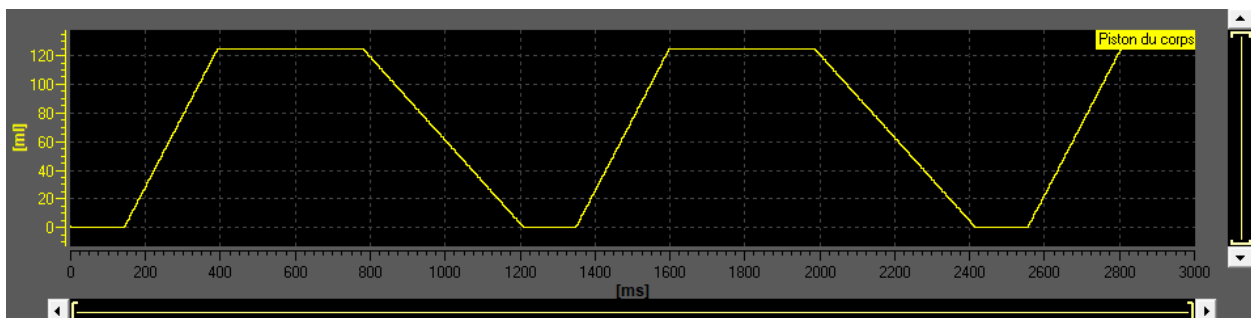


Figure 79: position du piston du corps

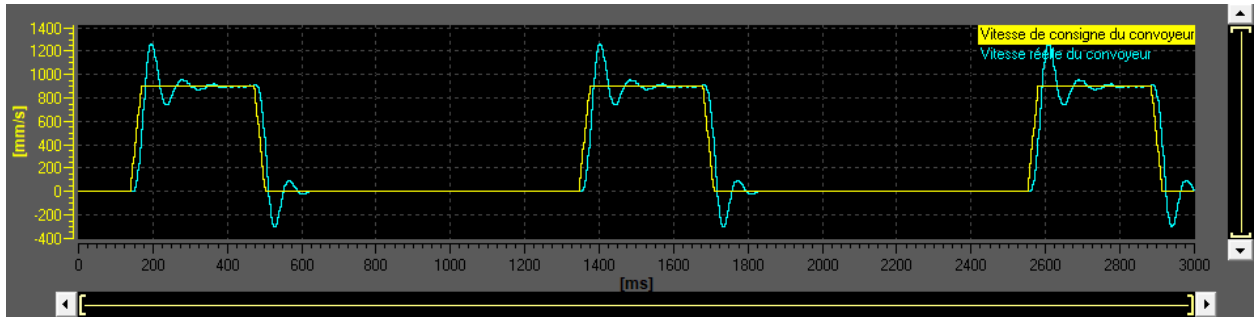


Figure 80:vitesse réel et de consigne du convoyeur

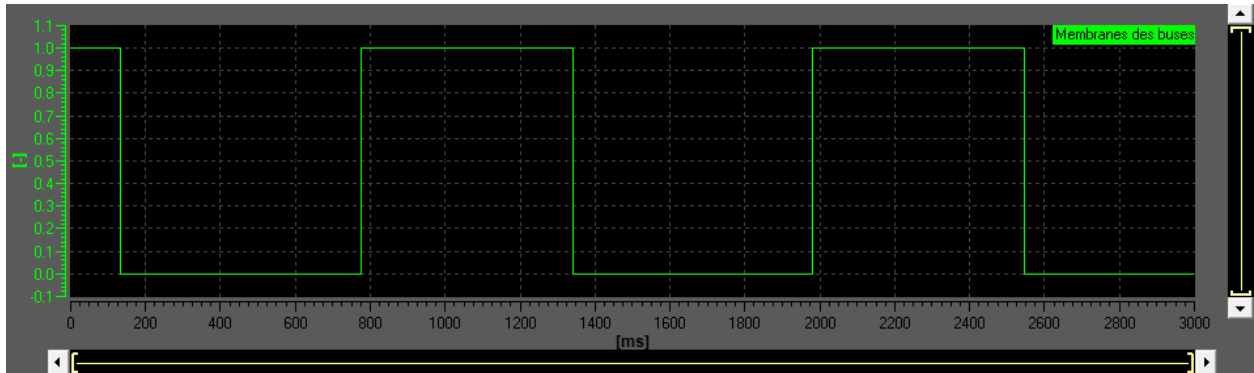


Figure 81: cycle des membranes des buses

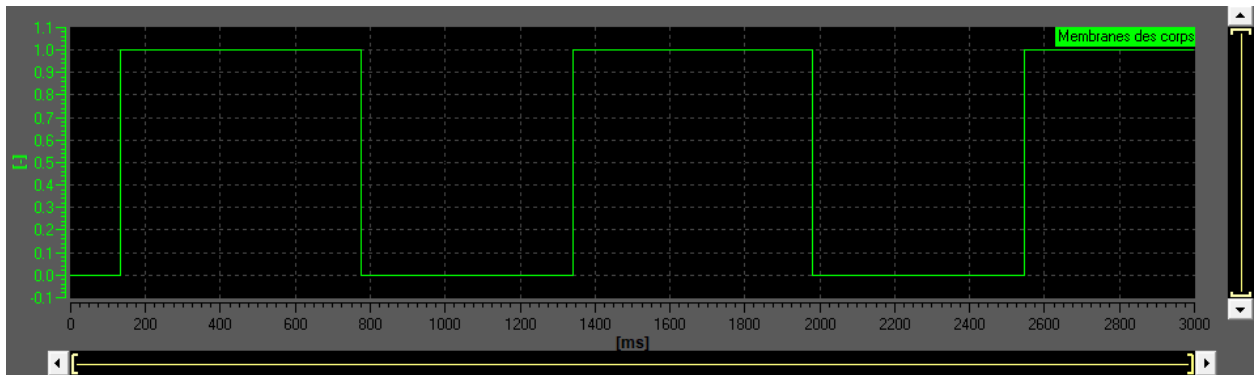


Figure 82:cycle des membranes des corps

# Conclusion générale

---

Ce projet de fin d'étude nous a offert une occasion d'améliorer nos connaissances dans le domaine du contrôle de mouvement grâce à notre travail avec Simotion. Nous avons pris l'usine de Danone comme exemple de référence et expliqué les étapes du conditionnement du yaourt, tout en simulant le dosage à l'aide du banc d'essais Simotion.

Au cours de notre étude, nous avons pu observer les avantages de cette technologie en termes de commande et de régulation. De plus, nous avons apprécié la possibilité de supervision et d'accès à toutes les données pertinentes. Il convient de souligner que l'échange de données entre l'unité de contrôle et les variateurs de vitesse est plus rapide que celui des automates programmables, et qu'un plus grand nombre d'axes peut être entraîné.

Un autre avantage notable réside dans la coordination des objets, notamment la synchronisation et la fonction Cam, qui permettent une meilleure coordination entre les axes.

Il existe d'autres gammes de contrôleurs de mouvements tel que : MELSERVO (Mitsubishi Electric) ; Kinetix (Rockwell Automation) ; Lexium (Schneider Electric) ; ACOPOS (B&R Automation) ; IndraMotion (Bosch Rexroth) ; Automation Controller (Parker Hannifin) ; MP3300iec (Yaskawa) ; IRC5 (ABB).

Enfin, nous espérons susciter un intérêt croissant dans ce domaine, car pour améliorer le secteur de la fabrication ou développer des outils de robotique, il est essentiel de savoir travailler avec des contrôleurs de mouvement tels que Simotion ou d'autres types de contrôleurs.

# Bibliographie

- [1] S. IGHESSANEN, « Etude du décalage de la chaîne opératoire d'une conditionneuse de yaourt ERCA EF-480. Danone Djurdjura ALGERIE », Institut National Spécialisé de la Formation Professionnelle et de Gestion Bejaia, 2015.
- [2] A. H. Cherif et I. Mayouf, « Commande et supervision d'une station de pompage à base d'automates programmables (Automates Schneider et Siemens) », 2018.
- [3] I. Tamourt, « Migration de la station NEP-Lait Cru du système ACCOS vers Siemens S7-400 », Ecole Nationale Polytechnique, 2019.
- [4] « Siemens, SITRAIN, Simotion », *Training for Automation and drive technology, MC-SMO-SYS\_01.2*, 9 février 2012.
- [5] « SIMOTION D4x5 ,Manuel de mise en service et de montage ». Siemens, février 2012.
- [6] W. Xiao-jun, S. Shu-dong, T. Zhi-xue, et H. Bo-yang, « The Remote Monitor and Control System for Motion Controller Based on the Ethernet », in *2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, Changsha, Hunan, China: IEEE, oct. 2010, p. 717-719. doi: 10.1109/ISDEA.2010.215.
- [7] « SIMOTION Motion Control System », *Industry Mall , Product catalogue and online ordering system for Digital Industries and Smart Infrastructure*.
- [8] « Motion Control System, SIMOTION, Équipements pour machines de production ». Siemens, 2017. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/885/109751885/att\\_933311/v1/SIMOTION-Motion-Control-System-PM21-complete-French-2017.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/885/109751885/att_933311/v1/SIMOTION-Motion-Control-System-PM21-complete-French-2017.pdf)
- [9] « Vue\_d\_ensemble\_documentation\_SIMOTION\_fr-FR.pdf ». Consulté le: 25 février 2023. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/534/109476534/att\\_844928/v1/Vue\\_d\\_ensemble\\_documentation\\_SIMOTION\\_fr-FR.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/534/109476534/att_844928/v1/Vue_d_ensemble_documentation_SIMOTION_fr-FR.pdf)
- [10] « Simotion Scout ,V5.4 ,Help ».
- [11] Siemens, « Simotion Scout, Simotion MCC Motion Control Chart ».
- [12] Siemens, « Simotion Scout, Simotion CONT/LOG ». février 2012.
- [13] H. RADJEL, « Modélisation des machines synchrones, comparaison entre essais pratiques et modèles numériques », in *2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, nov. 1993.
- [14] S. Chattopadhyay, M. Mitra, et S. Sengupta, « Clarke and Park Transform », in *Electric Power Quality*, in Power Systems. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, p. 89-96. doi: 10.1007/978-94-007-0635-4\_12.
- [15] L. Nezli et M. Mahmoudi, « Vector Control with Optimal Torque of a Salient-Pole Double Star Synchronous Machine Supplied by Three-Level Inverters », *Journal of Electrical Engineering*, vol. 61, n° 5, p. 257-263, sept. 2010, doi: 10.2478/v10187-010-0037-0.
- [16] M. Mahmoudi, « COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES, Support du cours ».
- [17] *Modeling, simulation and control of Synchronous Motor and PMSP By MATLAB*, (mai 2020). [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/@chouaiblabiod6682>



# Annexe

---

## Partie puissance :

Nom de composant : Motor\_Module\_3  
Type de composant : Double Motor Module  
N° de réf. : 6SL3120-2TE13-0Axx  
Puissance assignée : 1.6 kW  
Courant assigné : 3 A/3 A

Raccordement partie puissance :

## Moteur:

Type de moteur : [237] Moteur synchrone 1FK7  
N° de référence: 1FK7022-xAK7x-xxxx  
Vitesse assignée: 6000 U/min  
Couple assigné: 0.6 Nm  
Courant assigné: 1.4 A

## Frein d'arrêt moteur:

Frein d'arrêt du moteur : absent

## Codeur:

Nom du traitement de capteur 1 : SM\_4  
Nom Codeur 1 : Encoder  
Type de codeur Codeur 1 : 2048, 1 Vcàc, A/B C/D R  
N° de réf. capteur : 1 : 1FK7xxx-xxxxx-xAxx

## Echange de données process (entraînement):

Télégramme PROFIdrive : [999] Configuration de télégramme libre avec FCOM  
Extension de télégramme automatique  
Autoriser l'adaptation automatique des adresses

## Paramètres détaillés des moteurs utilisés

Type du moteur	Moteur synchrone 1FK7		
Texte du paramètre	Valeur	Unité	
Puissance assignée du moteur	0.38	kW	
Couple assigné du moteur	0.60	Nm	
Constante de tension du moteur	29.0	Veff	
Courant moteur à l'arrêt	1.80	Aeff	
Couple moteur à l'arrêt	0.85	Nm	
Courant assigné magnétisant/de court-circuit du moteur	5.900	Aeff	
Identif. de la position des pôles du moteur	Courant 1re phase	0.000	Aeff
Facteur de correction de couple de décrochage du moteur	76	%	
Angle de charge optimal du moteur	90.0	°	
Constante de couple réductant du moteur	0.00	mH	
Identification de la position des pôles du moteur	Courant	3.00	Aeff
Courant limite du moteur	8.00	Aeff	

Moment inertie du moteur	2.8e-05	kgm <sup>2</sup>		
Moment inertie Rapport total / moteur	1.000			
Vitesse de transition Réduction du champ Vdc = 600 V	14655.0		1/min	
Résistance du câble	0.00000	Ohm		
Moteur Inductance série	0.000	mH		
Adaptation du régulateur de courant Prise d'effet KP1.20	Aeff			
Adaptation du régulateur de courant Prise d'effet KP adaptée	8.00	Aeff		
Adaptation du régulateur de courant Gain P Adaptation	42.00	%		
Tension assignée du moteur	183	Veff		
Courant assigné du moteur	1.40	Aeff		
Vitesse assignée du moteur	6000.0	1/min		
Nombre paires pôles du moteur	3			
Constante de couple du moteur	0.46	Nm/A		
Moteur Vitesse maximale	10000.0	1/min		
Moteur Courant maximal	8.00	Aeff		
Vitesse maximale	10000.000	1/min		
Moteur Résistance stator à froid	4.20000	Ohm		
Moteur Inductance de fuite du stator	9.10000	mH		

**Lien vers les simulations Matlab :**

[https://drive.google.com/drive/folders/1pr9FnvI252bST3eLth7f4Q2AiGF7HKKQ?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1pr9FnvI252bST3eLth7f4Q2AiGF7HKKQ?usp=share_link)