الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
École Nationale Supérieure des Technologies Avancées
Département : Génie Électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

D'INGENIEUR d'État

Filière :

Automatique

Spécialité :

Automatique et Informatique Industrielle

Thème :

Automatisation et supervision des systèmes de vulcanisation des pneumatiques (IRIS Tyres Sétif)

Réalisé par

BENLOUNES Lounes
LACHEKHAB Imad Eddine

Soutenu le 22 / 06 / 2025

Les membres de Jury :

Président	M. CHERIFI Tarek	M.C.A	ENSTA
Promoteur	M. DERMOUCHE Reda	M.C.A	ENSTA
Co-Promoteur	M. HAMMADI Yassine	Expert métier	IRIS Tyres
Examinateur	M. NAIT SLIMANI Boukhalfa	M.A.A	ENSTA
Examinateur	M. ZAOUCHE Mohamed	M.C.A	ENSTA

Année universitaire 2024/2025

Dédicaces

“Avant toute chose, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m’avoir accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires pour mener à bien ce projet. Sans Sa guidance, rien de tout cela n’aurait été possible.

Je dédie ce travail à ma famille, pilier fondamental de ma vie, qui m’a toujours entouré d’un amour inconditionnel et d’un soutien indéfectible.

À mes parents, Maman et Papa, vous êtes les racines de tout ce que je suis. Merci de m’avoir transmis les valeurs essentielles du travail, de l’intégrité et de la persévérance. Votre confiance, vos sacrifices silencieux et votre amour inépuisable ont été les moteurs invisibles de mon parcours. Chaque réussite, chaque étape franchie porte l’empreinte de votre bienveillance.

À ma sœur et à mon frère, merci pour votre patience, vos encouragements et votre présence réconfortante, même quand mes obligations me rendaient moins disponible.Votre présence chaleureuse m’a donné la force d’aller au bout.

Un remerciement tout particulier à mon binôme de projet, Lounes, pour ton engagement, ton sérieux et la qualité de notre collaboration. Merci pour tes idées précieuses, ton esprit d’équipe exemplaire et ta capacité à rester concentré même dans les moments les plus complexes.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes amis proches, pour votre soutien constant, vos encouragements sincères et tous les moments de partage qui ont allégé la charge de ce travail.

Enfin, une pensée très spéciale pour mon cher ami et frère, Salah Eddine Chergui. Merci pour ton amitié fidèle, ton écoute attentive et ton soutien indéfectible. Ta présence a été un vrai réconfort tout au long de cette aventure. Je te souhaite de tout cœur un avenir rempli de succès, à la hauteur de ta valeur et de ta persévérance.”

Imad Eddine

Dédicaces

“ Avant toute chose, je remercie mon Seigneur et Créateur, Celui qui m’a enseigné ce que j’ignorais.

À mes chers parents, mon père et ma maman, Je vous suis infiniment reconnaissant pour tout l’amour, les sacrifices et les innombrables efforts que vous avez déployés pour moi, année après année. Vous avez toujours été là, dans chaque étape de ma vie, me soutenant sans condition, que ce soit dans mon parcours académique ou dans les moments les plus durs. Votre présence a été ma force, votre tendresse ma paix. Je n’aurai jamais assez de mots pour vous remercier comme vous le méritez. Alors, je vous dis simplement, avec tout l’amour d’un fils : je vous aime. Je resterai toujours votre petit enfant, celui qui ne trouve la paix qu’auprès de vos bras pleins de douceur. .

À mes deux frères, Avec vous, j’ai partagé les plus beaux moments de ma vie, ceux de notre enfance, faits de rires, de jeux et de souvenirs inoubliables. Votre présence a toujours été pour moi une source de joie, de force et de réconfort.

À mon petit frère Louai, Toi, le plus jeune trésor de notre famille, arrivé comme une lumière douce qui éclaire nos journées. Ton sourire est une source de bonheur inestimable pour ton grand frère. Dans ton regard innocent, tes gestes maladroits et ta petite voix, je revois une part de moi, et je ressens un lien si fort qu’il m’émeut profondément. Un jour, tu grandiras et tu comprendras que, depuis ton tout premier souffle, ton grand frère t’était infiniment reconnaissant, et qu’il t’aimait déjà d’un amour pur et silencieux.

À tous mes amis proches Avec vous, j’ai partagé et je partage encore les plus beaux moments de ma vie. Je vous aime profondément et je vous remercie d’être là, tout simplement. Une pensée particulière pour mon ami Faouzi, avec qui j’ai vécu des moments précieux, faits de rires, de discussions sincères et d’un véritable esprit de camaraderie. Merci d’être toujours là.

À mon binôme de travail Imad, Collaborer avec vous sur ce projet a été bien plus qu’une simple expérience de travail : c’était un véritable plaisir partagé. Votre sérieux, votre rigueur et votre patience ont marqué chaque étape de notre parcours commun. J’ai eu la chance de découvrir non seulement vos idées, mais aussi votre imagination brillante et votre esprit d’équipe. Merci pour ces moments de complicité professionnelle. Je vous souhaite sincèrement tout le succès que vous méritez dans la suite de votre vie.”

Lounes

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à **M. Reda DERMOUCHE**, notre encadrant, pour sa disponibilité, sa patience et la qualité de ses conseils. Son accompagnement rigoureux et ses remarques pertinentes ont grandement contribué à l'orientation et à la réussite de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à **M. HAMMADI Yassine**, notre co-encadrant, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son implication constante. Son expertise et sa vision technique ont été d'un apport précieux dans les différentes phases du projet.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants et du personnel administratif de l'**ENSTA**, qui ont su nous transmettre les connaissances, les compétences et l'encadrement nécessaires tout au long de notre cursus.

À nos collègues de promotion, pour les moments partagés, l'entraide et les discussions enrichissantes. Nous avons parcouru ce chemin ensemble et nous vous en sommes reconnaissants.

Nous remercions sincèrement l'entreprise **IRIS TYRES** pour nous avoir accueillis au sein de ses équipes et pour nous avoir permis de mener ce projet dans un environnement industriel réel.Cette immersion a été une expérience très formatrice et enrichissante.

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى أتمتة ومراقبة آلة تشكيل الإطارات في مصنع إيريس. يتمحور حول أربعة جوانب رئيسية: تطوير نظام تحكم ضبابي متكيف لضبط ضغط التشكيل، تنفيذ نظام تحكم تقليدي للتحكم في قوة الإغلاق، تصميم واجهة تفاعلية حديثة بين المشغل والآلة، وتطوير نظام مراقبة وتحكم عن بعد يعمل عبر الويب ويعتمد على قواعد بيانات حديثة. من خلال دمج تقنيات متطورة ووحدات تحكم صناعية ذكية، يساهم هذا المشروع في تحسين استقرار عملية الطهي، تقليل العيوب في المنتج النهائي، وتعزيز إمكانية تتبع العمليات الصناعية بشكل دقيق.

كلمات مفتاحية: مصنع إيريس، الفلكنة، التحكم الضبابي، الواجهة التفاعلية، المراقبة الصناعية، الأتمتة، تتبع الإنتاج.

Résumé

Ce projet vise à automatiser et superviser une presse de vulcanisation de pneus au sein de l'usine IRIS Tyres. Il s'articule autour de quatre axes principaux : le développement d'un régulateur PID flou adaptatif pour la pression de formage, l'implémentation d'un PID classique pour la force de serrage, la conception d'une interface HMI moderne , ainsi que le développement d'une interface SCADA Web basée sur Node-RED et MongoDB. En intégrant des technologies avancées telles que OPC UA, les automates Siemens S7-1500, et les régulations intelligentes, ce projet améliore la stabilité du cycle de cuisson, réduit les défauts de production et renforce la traçabilité industrielle.

Mots clés :IRIS Tyres, vulcanisation, régulation PID floue, HMI, SCADA, OPC UA, Node-RED, automatisation.

Abstract

This project focuses on the automation and supervision of a tire vulcanization press at IRIS Tyres. It is based on four main pillars : the development of an adaptive fuzzy PID controller for forming pressure, implementation of a standard PID for clamping force, design of a modern HMI, and development of a Web-based SCADA system using Node-RED and MongoDB. By integrating advanced technologies such as OPC UA, Siemens S7-1500 PLCs, and intelligent control strategies, this project enhances process stability, reduces production defects, and strengthens industrial traceability.

Keywords :IRIS Tyres, vulcanization, fuzzy PID control, HMI, SCADA, OPC UA, Node-RED, automation.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale **1**

Chapitre I : Généralités sur l'entreprise et processus de fabrication **3**

I.1 Introduction 4

I.2 Présentation de l'entreprise 4

I.2.1 Généralités 4

I.2.2 Historique de l'entreprise 5

I.2.3 Localisation géographique 5

I.2.4 Capacité et qualité de production 5

I.2.4.1 Capacité de production et évolution 5

I.2.4.2 Qualité et conformité aux normes internationales 5

I.2.4.3 Mise en œuvre des tests et certifications pour la conformité . 6

I.2.4.4 Gamme de produits IRIS TYRES 6

I.3 Caractéristiques techniques et constitution du pneu 7

I.3.1 Définition du pneu 7

I.3.2 Composants du pneu 7

I.4 Processus de fabrication des pneus 8

I.4.1 Bloc C : Département des mélanges 9

I.4.1.1 Zone de Préparation des Ingrédients 9

I.4.1.2 Zone de mélange (Mixage des matières premières) 9

I.4.1.3 Zone de stockage 10

I.4.1.4 Laboratoire de recherche et développement 11

I.4.2 Bloc B : Département des Composants 11

I.4.2.1 Premier étage : Préparation des composants 12
I.4.2.2 Deuxième étage : Assemblage des pneus verts 12
I.4.3 Bloc A : Inspection et Contrôle Qualité des Pneus 15
I.4.3.1 Inspection Visuelle et Enregistrement 16
I.4.3.2 Suivi des Décisions et Assurance Qualité 16
I.4.3.3 Contrôle Qualité Automatisé via la Machine ZF 17
I.4.3.4 Test de Force 18
I.4.3.5 Étiquetage et Stockage 19
I.5 Description et principe de fonctionnement de la presse de vulcanisation 20
I.5.1 Circuit de Vulcanisation des Pneus 20
I.5.2 Fonctionnement de la Presse de Vulcanisation 20
I.5.3 Types de Presses 21
I.5.4 Équipements et Spécificités Techniques 22
I.5.5 Cycle de Vulcanisation : Séquence Opérationnelle 23
I.6 Problematique et solution 26
I.6.1 Problematique 26
I.6.2 Solutions Proposées 28
I.7 Conclusion 28
Chapitre II : Description du Système Automatisé et des Logiciels Utilisés 29
II.1 Introduction 30
II.2 Architecture fonctionnelle du système automatisé 30
II.3 Éléments de la partie opérative : 30
II.3.1 Les capteurs : 30
II.3.2 Les pré-actionneurs : 35
II.3.3 Les actionneurs : 37
II.3.4 Station Hydraulique : 38
II.3.4.1 Moteur Électrique 39
II.3.4.2 Pompe haute pression à palette : 40
II.3.4.3 Pompe basse pression à engrenage : 40
II.4 La partie pupitre : 40

II.5 Éléments de la partie commande : 41
II.5.1 Automate Programmable Industriel (API) : 41
II.5.1.1 Automate programmable Siemens S7-1500 : 42
II.5.2 Stations déportées ET200 SP : 44
II.5.2.1 Présentation générale : 44
II.5.3 HMI (Interface-Homme Machine) : 45
II.6 Logiciels utilisés dans le projet : 45
II.6.1 TIA Portal : 45
II.6.1.1 Présentation générale : 45
II.6.1.2 Étapes de développement dans TIA Portal : 45
II.6.2 OPC UA : 48
II.6.2.1 Rôle de UaExpert dans le projet 49
II.7 Conclusion 50
Chapitre III : Développement et programmation **51**
III.1 Introduction 52
III.2 Configuration réseau et communication 52
III.2.1 Topologie et interconnexion des équipements 52
III.2.2 Protocole de communication : PROFINET 53
III.2.2.1 Caractéristiques principales de PROFINET 53
III.2.2.2 Architecture fonctionnelle du réseau PROFINET 53
III.3 Déclaration et organisation des variables 54
III.4 Structure et organisation du programme 54
III.4.1 Blocs d'organisation (OB) 55
III.4.2 Blocs fonctionnels (FB) 56
III.4.3 Fonctions (FC) 56
III.4.4 Blocs de données (DB) 56
III.5 Programmation de l'automate 57
III.5.1 La partie opérative 57
III.5.1.1 Partie chargeur 57
III.5.1.2 Partie déchargeur 58

III.5.1.3 Partie presse 59
III.5.1.4 Partie convoyeur 60
III.5.2 Normalisation et mise à l'échelle des signaux 61
III.5.3 Régulation (PID) 62
III.5.3.1 Présentation du bloc PID standard (PID_Compact) 62
III.5.3.2 PID Tuning 63
III.5.3.3 Autotuning PID dans le S7-1500 : principe et fonctionnement 63
III.5.4 Optimisation d'un régulateur PID par une stratégie adaptative floue . . 69
III.5.4.1 Principe de la régulation PID adaptative floue 69
III.5.4.2 Théorie des Contrôleurs Flous 70
III.5.4.3 Structure du contrôleur flou dans le contexte PID 71
III.5.4.4 Implémentation du PID adaptatif : 75
III.5.4.5 Analyse des réponses du système : PID classique vs PID adaptative floue 78
III.5.4.6 Interprétation des résultats 78
III.5.5 Gestion des alarmes 79
III.5.6 Comptage des pneus et gestion des shifts 79
III.6 Conclusion 81
Chapitre IV : Développement de l'IHM et de l'interface SCADA 82
IV.1 Introduction 83
IV.2 Interface Homme-Machine (HMI) 83
IV.2.1 Configuration des variables HMI 83
IV.2.2 Configuration des alarmes 84
IV.2.3 Gestion des utilisateurs 84
IV.2.4 Configuration des vues de l'IHM 84
IV.3 Interface SCADA 90
IV.3.1 Introduction aux systèmes SCADA 90
IV.3.2 Environnement de développement : Node-RED 91
IV.3.3 Backend : Traitement et Gestion des Données 92
IV.3.4 Stockage et Gestion des Données 92

IV.3.5 Scalabilité et Structure de Sauvegarde des Données 93
IV.3.6 Interface Utilisateur : Supervision et Visualisation (Frontend) 94
IV.3.7 Sécurité et Gestion des Accès : 95
IV.3.8 Compatibilité Multi-Plateforme et Accès Distant 95
IV.3.9 Déploiement Sécurisé de l'Interface SCADA avec Ngrok 95
IV.3.10 Architecture du Système 96
IV.3.11 Interfaces du Système SCADA Développé 97
IV.3.11.1 Interface de Connexion (Login) 97
IV.3.11.2 Tableau de Bord (Dashboard) 97
IV.3.11.3 Données en Temps Réel (Real-Time Data) 98
IV.3.11.4 Configuration de Recette (Edit Recipe) 99
IV.3.11.5 Paramètres du Profil 101
IV.3.11.6 Implémentation de l'IHM et de l'interface SCADA 101
IV.4 Conclusion 102
Conclusion générale **103**
Bibliographie **107**
Chapitre A : Composants du système d'automatisation **108**
A.1 Automate S7-1515-2 PN 109
A.1.1 Caractéristiques techniques du CPU S7-1515-2 PN 109
A.2 Interface Homme-Machine (HMI) TP900 Comfort 110
A.2.1 Caractéristiques techniques du TP900 Comfort 110
Chapitre B : Schémas Électriques, Pneumatiques et Hydrauliques **112**
Schéma E1 : Structure de distribution de puissance 122
Schéma E2 : Boîtes de distribution actionneurs/capteurs 131
Schéma E3 : Structure de communication ProfiNet/Ethernet 137
Schéma E4 : Commande des mouvements et du chauffage 139
Chapitre C : Marquage et Caractéristiques Techniques des Pneus **140**
C.1 Tableau explicatif d'une inscription de pneu 141
C.2 Tableau des largeurs de pneus courantes 141
C.3 Tableau des rapports d'aspect (hauteur du flanc) 142

C.4 Type de structure (lettre après le rapport d'aspect) 142
C.5 Diamètre de jante (en pouces) 143
C.6 Tableau complet des indices de charge 143
C.7 Tableau complet des indices de vitesse 144

Liste des figures

I.1 Siège de IRIS Tyres 4
I.2 Localisation de l'usine 5
I.3 Gamme de Produits de l'entreprise [1] 7
I.4 Composants du pneu [2] 8
I.5 BUILDING A ET B [2] 9
I.6 Zone de Préparation des Ingrédients [1] 9
I.7 Zone de mélange des matières premières [1] 10
I.8 Stock des matières premières [1] 10
I.9 Stock après le mixage [1] 11
I.10 Laboratoire de recherche et développement [1] 11
I.11 Bloc B [2] 12
I.12 La machine TB Side [3] 13
I.13 Servomoteur [3] 13
I.14 La machine CC Side [3] 14
I.15 Caméra QR [3] 14
I.16 Machine ILMBERGER [3] 15
I.17 Système tampon [3] 15
I.18 Système EMS [3] 15
I.19 Bloc A [2] 16
I.20 Inspection Visuelle [3] 16
I.21 Interface de Suivi des Décisions [3] 17
I.22 Centralisation du Pneu [3] 17
I.23 Tests de Contrôle et Inspection par Capteurs UV [1] 18

I.24 Étiquetage Automatisé des pneus [1] 19
I.25 Robot CIMCORP [1] 19
I.26 Robot KUKA [1] 19
I.27 Stock des pneus finis [1] 20
I.28 Les étapes de la partie cuisson [2] 21
I.29 Presse mécanique 22
I.30 Presse hydraulique 22
I.31 Les équipements de la presse 22
I.32 Chargement du pneu [3] 23
I.33 Dépôt du pneu dans la presse [3] 23
I.34 La position finale [3] 23
I.35 La presse commence à se fermer [3] 24
I.36 La presse fermée [3] 24
I.37 Déchargement du pneu [3] 25
I.38 Convoyeur de Pneus [3] 25
I.39 Interface de Suivi des Décisions 26
I.40 Interface de Suivi des Décisions 26
I.41 Interface de Suivi des Décisions [3] 27

II.1 Les parties d'un système automatisé 30
II.2 Principe de fonctionnement du capteur 31
II.3 Capteur de pression [4] 31
II.4 Pressostat [5] 31
II.5 Capteur de température Pt100 [5] 32
II.6 Thermostat [3] 32
II.7 Ecodeur linéaire [6] 33
II.8 Principe de fonctionnement du Capteur de proximité inductif [7] 33
II.9 Capteur de proximité inductif [7] 33
II.10 Capteur pneumatique de sécurité [3] 34
II.11 Capteur photoélectrique [7] 34
II.12 Capteur photoélectrique dans presse [3] 35

II.13 Principe de fonctionnement du pré-actionneur 35
II.14 Distributeur pneumatique [3] 36
II.15 Distributeur hydraulique [8] 36
II.16 Contacteur [9] 37
II.17 Vérin hydrauliques [10] 37
II.18 Vérin pneumatique [11] 38
II.19 Vannes proportionnelles [8] 38
II.20 Station Hydraulique [3] 39
II.21 Moteur de refroidissement d'huile [3] 39
II.22 Principe de fonctionnement de la pompe à palette [12] 40
II.23 Pompe à engrenage [13] 40
II.24 La partie pupitre [3] 41
II.25 Architecture d'un API [14] 42
II.26 Configuration du rack de l'API 43
II.27 CPU 1515-2 PN [15] 43
II.28 Les modules de ET200SP Vue TIA Portal 44
II.29 Références des modules du ET200SP vue TIA PORTAL 44
II.30 HMI TP900 Comfort vue TIA PORTAL 45
II.31 Création du projet dans TIA PORTAL vue TIA PORTAL 46
II.32 Ajout du CPU vue TIA PORTAL 46
II.33 Ajout du HMI vue TIA PORTAL 47
II.34 Ajout du ET200SP IM 155-6 PN ST vue TIA PORTAL 47
II.35 Protocole de communication OPC UA 48
II.36 URL OPC UA 49
II.37 Vue de logiciel OPC UA Expert 49

III.1 Interfaçage réseau 52
III.2 Profinet (Process Field Network) 53
III.3 Architecture réseau mise en place 53
III.4 DB d'instance associé au bloc `Roller_DB` 54
III.5 La table des variables des blocs NORM et SCALE 54

III.6 Illustration des Blocs Utilisés dans le Projet 55
III.7 Bloc d'organisation (OB1) 55
III.8 Bloc d'organisation (OB100) 56
III.9 DB global comme mémoire centrale 57
III.10 OB1 – Chargeur en mode automatique 57
III.11 OB1 – Chargeur en mode manuel 58
III.12 OB1 – Déchargeur en mode automatique 58
III.13 OB1 – Déchargeur en mode automatique 59
III.14 OB1 – Presse mode automatique (fermeture) 59
III.15 OB1 – Presse mode automatique (Ouverture) 60
III.16 OB1 – Presse mode manuel 60
III.17 Programme de commande du Convoyeur 60
III.18 La mise à l'échelle de la température de Chauffage (Heating) 61
III.19 Appel du FB de mise à l'échelle de la température de Chauffage dans l'OB1 . 62
III.20 Régulation PID pression shaping 63
III.21 Classification des Méthodes de Réglage PID 63
III.22 Processus d'Autotuning PID 64
III.23 Architecture du Système de Régulation PID avec Auto-Tuning 64
III.24 Boucle de régulation (PID) 64
III.25 OB30 le bloc de régulation PID pression shaping 65
III.26 Type de régulation 65
III.27 Choix de régulateur. 66
III.28 OB31 bloc de régulation PID Heating. 66
III.29 Type de régulation 67
III.30 Choix de régulateur 67
III.31 Boucle de régulation (PID) de la force de serrage (Squeeze) 67
III.32 OB32 bloc de régulation PID Squeeze 68
III.33 Type de régulation 68
III.34 Choix de régulateur. 69
III.35 Principe d'adaptation du régulateur par la logique floue 69

III.36 Architecture d'une régulation PID adaptative basée sur un contrôleur flou . . . 70
III.37 Exemple de différentes formes des fonctions d'appartenance. 71
III.38 Schéma générale d'une commande floue 71
III.39 Fonctions d'appartenance de l'erreur e 73
III.40 Fonctions d'appartenance de la variation de l'erreur Δe 73
III.41 Fonctions d'appartenance des sorties (ΔK_p, ΔK_i) 73
III.42 Règles floues pour le gain K_p 74
III.43 Règles floues pour le gain K_i 74
III.44 Activation du serveur OPC UA dans le PLC via TIA Portal 75
III.45 Connexion au serveur OPC UA via UA Expert 76
III.46 Suivi en temps réel des variables du PLC dans UA Expert 77
III.47 Connexion pour lecture et écriture des données via un contrôleur flou en Python 77
III.48 Réponse du Système à un PID Classique (Kp=8.5,Ki=1.5) 78
III.49 Réponse du Système à un PID Adaptative (Kp=8.5,Ki=1.5 initiaux) 78
III.50 Configuration des Réseaux d'Alarme dans TIA Portal 79
III.51 Programme de comptage des pneus par shift 80

IV.1 Exemple de configuration des variables HMI 83
IV.2 Exemple de table d'alarmes 84
IV.3 Configuration des profils et droits d'accès utilisateur 84
IV.4 Vue d'accueil 85
IV.5 Vue d'alarmes 85
IV.6 Vue de l'écran de connexion 86
IV.7 Vue de gestion des utilisateurs 86
IV.8 Vue du compteur par shift 87
IV.9 Vue des modes de fonctionnement 87
IV.10 Vue des régulations PID (Heating, Shaping et Squeeze) 88
IV.11 Vue de sécurité (Safety) 88
IV.12 Vue des recettes sauvegardées 89
IV.13 Vue Parameters 89
IV.14 Vue gestion des recettes 90

IV.15 Architecture de SCADA 91
IV.16 Node-RED Dashbord bloc. 91
IV.17 Architecture du backend 92
IV.18 Les principales fonctionnalités de MongoDB 93
IV.19 format de sauvegarde 93
IV.20 Les éléments principaux du frontend 94
IV.21 l'Affichage de l'interface sur un PC et un Smartphone. 95
IV.22 Commande d'accès à l'interface à distance via Ngrok 96
IV.23 Schéma global de l'architecture du système SCADA 96
IV.24 Vue de l'Interface de Connexion (Login) 97
IV.25 Vue de tableau de Bord (Dashboard) 98
IV.26 Vue de l'interface d'affichage des données (Press Live Monotoring) 99
IV.27 Données de température enregistrées dans MongoDB 99
IV.28 Vue de Configuration de Recette (Recipe Edit) 100
IV.29 Vue de Recettes de fabrication des pneus dans MongoDB 100
IV.30 Vue de Paramètres du Profil 101
IV.31 Implémentation de l'IHM et de l'interface SCADA 102

A.1 CPU 1515-2 PN [15] 110
A.2 HMI TP900 Comfort [16] 111

C.1 Pneu ECORIS (205/55R16 94V) 141

Liste des tableaux

A.1 Caractéristiques techniques du CPU S7-1515-2 PN [15] 109
A.2 Caractéristiques techniques du SIMATIC HMI TP900 Comfort (réf. 6AV2 124-0JC01-0AX0) [16] 110

C.1 Détails de l'inscription 205/55R16 94V sur le pneu ECORIS [2] 141
C.2 Correspondance entre la largeur de pneu et le type de véhicule [2] 142
C.3 Classification des rapports d'aspect selon la hauteur du flanc [2] 142
C.4 Interprétation des lettres de structure dans une inscription de pneu [2] 142
C.5 Correspondance entre le diamètre de jante et le type de véhicule [2] 143
C.6 Correspondance entre indice de charge et poids maximal supporté [2] 143
C.7 Correspondance entre indice de vitesse, limite maximale et usage [2] 144

Liste des abréviations

R&D Recherche et Développement

ISO International Organization for Standardization(Organisation internationale de normalisation)

IATF International Automotive Task Force (Groupe de travail international de l'automobile)

QR Quick Response (code QR – Code à réponse rapide)

MFE Mémoire de fin d'études

RFV Radial Force Variation (Variation de la force radiale)

LFV Lateral Force Variation (Variation de la force latérale)

TFV Tangential Force Variation (Variation de la force tangente)

UV Ultraviolet (Ultraviolet)

VMI Nom du fabricant néerlandais de machines pour l'industrie du pneu

CC Carcass

TB Tread/Belt

PID Proportionnel Intégral Dérivé

SCADA Supervisory Control And Data Acquisition (Supervision, Contrôle et Acquisition de Données)

API Automate Programmable Industriel

E/S Entrée/Sortie

CPU Central Processing Unit (Unité Centrale de Traitement)

LAD Ladder Diagram (Langage à contacts)

FBD Function Block Diagram (Diagramme à blocs fonctionnels)

STL Statement List (Liste d'instructions)

SCL Structured Control Language (Langage de programmation structuré)

Liste des abréviations

IRT Isochronous Real Time (Temps Réel Isochrone)

IO Input/Output (Entrée/Sortie)

PLC Programmable Logic Controller (Automate Programmable Industriel)

Introduction générale

L'industrie du pneumatique est un secteur particulièrement exigeant, où la qualité, la fiabilité et la régularité du produit fini dépendent étroitement du contrôle précis des procédés de fabrication. Pour répondre à ces exigences tout en renforçant sa compétitivité, IRIS TYRES projette de moderniser le processus de vulcanisation de ses pneus en intégrant des technologies avancées d'automatisation, de régulation et de supervision.

La qualité de la vulcanisation repose principalement sur trois paramètres, à savoir la température de cuisson, la pression de formage et la force de serrage. Actuellement, la pression de formage et la force de serrage sont mal maîtrisées, ce qui impacte directement la stabilité et la qualité du cycle de cuisson.

La pression de formage, pourtant essentielle pour assurer une bonne adhésion des couches, une homogénéité dimensionnelle et un transfert thermique efficace, est sujette à de fortes perturbations. Ce paramètre est difficile à stabiliser en utilisant un régulateur classique, qui s'avère peu efficace face aux dynamiques fluctuantes du procédé. Il en résulte des dépassements de consigne, des instabilités et des défauts de cuisson, qui ont un impact direct sur la qualité du produit.

Dans notre système, la force de serrage est encore réglée manuellement, sans aucun contrôle automatique. Cela provoque des variations d'un cycle à l'autre et favorise l'apparition de défauts tels que le flashing ou les bulles d'air, affectant directement la conformité des pneus.

Malgré l'impact critique de ces deux paramètres, aucune solution de régulation efficace et durable n'a encore été mise en place par IRIS TYRES. Par ailleurs, Par ailleurs, l'interface homme-machine (IHM) actuellement utilisée permet une gestion des recettes via des fiches papier, ce qui limite la réactivité des opérateurs. Le Système de Contrôle et d'Acquisition de Données (SCADA) en place est rigide, fermé, non accessible à distance et conçu dans une langue étrangère (chinoise), ce qui restreint fortement les possibilités d'évolution, de maintenance et de supervision.

Face à ce constat, ce projet propose une refonte complète du système de régulation et de supervision de la presse de vulcanisation, à travers quatre axes majeurs :

- Développement d'un contrôleur PID flou adaptatif pour la pression de formage. Ce régulateur est capable d'ajuster dynamiquement ses gains selon les variations du processus. Il est implémenté via un script Python connecté à l'automate Siemens S7-1500 grâce au protocole OPC UA, garantissant une communication bidirectionnelle en temps réel et une application immédiate des actions correctives. Des tests progressifs sont réalisés sous la

supervision des ingénieurs d'IRIS TYRES, afin de garantir la sécurité du système automatisé ainsi que celle des opérateurs.

- Implémentation d'un régulateur PID classique pour la force de serrage, assurant un contrôle automatique simple et efficace du processus.
- Conception d'une nouvelle interface IHM moderne, ergonomique et évolutive, permettant la sélection automatique des recettes, la visualisation en temps réel des paramètres critiques (pression, température, force), la gestion des alarmes, ainsi que le pilotage manuel ou automatique de la presse.
- Développement d'un système SCADA Web multiplateforme, basé sur Node-RED, assurant une supervision à distance sécurisée, une interface accessible sur tout support (PC, tablette, smartphone), la centralisation des données sur MongoDB, et des outils visuels tels que des courbes de tendance, historiques, tableaux de bord interactifs et notifications d'alerte.

La mise en œuvre de ce système automatisé, régulé et supervisé permettra de réduire les pertes, stabiliser le cycle de vulcanisation, améliorer la qualité des pneus produits, et accroître la productivité de l'usine. Ce projet s'inscrit dans une stratégie de modernisation industrielle nationale, valorisant l'innovation locale, l'autonomie technologique, et répondant aux normes internationales de qualité et de traçabilité.

Ce mémoire est organisé en quatre (4) chapitres :

Le premier chapitre présente une vue globale sur l'entreprise IRIS Tyres et son processus de fabrication des pneumatiques, en mettant en lumière les départements clés, les équipements de production, ainsi que le fonctionnement de la presse de vulcanisation. Il se terminera par une analyse des limitations actuelles du système, débouchant sur une problématique claire et les solutions proposées.

Le deuxième chapitre est consacré à la description technique du système automatisé mis en place, en détaillant les éléments de la partie opérative (capteurs, actionneurs, vérins, station hydraulique) ainsi que ceux de la partie commande (automate Siemens S7-1500, modules déportés, interface opérateur). Les logiciels utilisés dans le projet seront également présentés.

Le troisième chapitre est dédié à la conception et à la programmation de la solution, où nous décrivons la configuration réseau, la structuration du programme automate, la mise en œuvre des régulations classiques et intelligentes (notamment la régulation floue adaptative), ainsi que l'analyse comparative des performances obtenues.

Le quatrième chapitre traite du développement des interfaces de supervision, incluant la conception d'IHM moderne et intuitive, ainsi que la mise en œuvre d'un système SCADA web multiplateforme basé sur Node-RED et MongoDB. Ce chapitre présentera également les fonctionnalités avancées du système telles que la surveillance en temps réel, la gestion des recettes, le comptage intelligent des pneus et les alertes sécurisées.

Chapitre I

Généralités sur l'entreprise et processus de fabrication

I.1 Introduction

La fabrication des pneumatiques est un processus industriel complexe, regroupant une série d'étapes techniques interconnectées qui vont de la préparation des matériaux à la vulcanisation finale du produit. Ce chapitre a pour objectif de présenter de manière détaillée le processus de fabrication des pneumatiques dans une usine spécialisée, en mettant particulièrement l'accent sur les départements clés et les technologies utilisées dans le cadre de la production.Ce projet de fin d'étude se concentre sur l'automatisation et la supervision des presses de vulcanisation dans le département B de l'usine Iris Tyres, un acteur majeur dans l'industrie du pneu, reconnu pour son expertise et son engagement envers l'innovation technologique. À travers une analyse approfondie de chaque étape de production, nous exposerons les défis techniques rencontrés, notamment dans la gestion des paramètres critiques comme la pression de formage et la force de serrage des presses, et proposerons des solutions d'automatisation avancées visant à optimiser la qualité et la productivité des pneumatiques fabriqués. Ce chapitre introduira également les enjeux liés à l'intégration des systèmes automatisés et à la mise en place d'une régulation performante pour garantir un contrôle de qualité rigoureux tout au long du processus de vulcanisation.

I.2 Présentation de l'entreprise

I.2.1 Généralités

SARL IRIS TYRES (figure I.1) est une entreprise dédiée à la conception et à la production de pneumatiques. Elle met un point d'honneur à développer en permanence de nouveaux matériaux et à créer des modèles adaptés aux différents besoins du marché L'entreprise s'appuie sur une équipe hautement qualifiée, dotée d'une solide expertise et maîtrisant les technologies modernes. Grâce à l'utilisation d'équipements de pointe et à un strict respect des normes de fabrication, IRIS TYRES garantit des produits robustes et performants, capables de résister aux contraintes les plus exigeantes [1].



Figure I.1 : Siège de IRIS Tyres

I.2.2 Historique de l'entreprise

L'histoire d'IRIS TYRES remonte à 2004 avec la fondation de l'EURL SATEREX, une entreprise algérienne spécialisée dans l'électronique, l'électroménager et la téléphonie. Au fil des années, IRIS s'est imposé comme un acteur majeur de l'électronique grand public notamment dans le secteur de la télévision. Fort de son succès, le groupe a diversifié ses activités en développant un pôle industriel englobant plusieurs secteurs. Cette expansion stratégique a conduit, en 2017, à la création d'un complexe dédié à la production de pneumatiques, un projet d'envergure qui a positionné IRIS TYRES comme le premier fabricant de pneus en Algérie et le troisième en Afrique [1].

I.2.3 Localisation géographique

IRIS TYRES c'est un projet grandiose, un méga complexe industriel bâti sur une superficie de 5,5 Hectares situé à la zone industrielle de Sétif (figure I.1) [1]. Cette implantation stratégique facilite la logistique et la distribution des produits à l'échelle nationale et internationale.



Figure I.1 : Localisation de l'usine

I.2.4 Capacité et qualité de production

I.2.4.1 Capacité de production et évolution

IRIS TYRES a mis en place un processus de fabrication 100 % local, avec une capacité initiale estimée à 2 millions de pneus par an (pneus légers, utilitaires et semi-lourds). Cette cadence connaîtra une augmentation significative pour atteindre 4,5 millions de pneus par an lors de la deuxième phase de développement [1].

I.2.4.2 Qualité et conformité aux normes internationales

IRIS TYRES s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue visant à renforcer la qualité de ses produits et à garantir une conformité rigoureuse aux normes internationales. Bien que

l'entreprise ait déjà mis en place un système structuré de gestion de la qualité, des efforts restent nécessaires pour atteindre un niveau de performance pleinement conforme à ses ambitions et aux standards des leaders du secteur. Le laboratoire R&D et les dispositifs de contrôle contribuent activement à cette dynamique en réalisant quotidiennement des vérifications techniques et des essais poussés [1].

I.2.4.3 Mise en œuvre des tests et certifications pour la conformité

Dans ce cadre, IRIS TYRES soumet ses pneus à des essais rigoureux portant sur le freinage, le bruit, la consommation de carburant, l'usure, la résistance à haute vitesse, la durabilité et la performance. Ces tests sont menés dans des environnements contrôlés, en collaboration avec des organismes étrangers spécialisés disposant de bancs d'essai et de pistes de test, notamment en Finlande et en Allemagne. À la suite d'un audit concluant, l'entreprise a obtenu une certification européenne attestant de la conformité de son système de management. Elle applique également un système intégré répondant aux normes internationales : ISO 9001:2015 (management de la qualité), ISO 14001:2015 (management environnemental) et IATF 16949:2016 (industrie automobile) [1].

I.2.4.4 Gamme de produits IRIS TYRES

IRIS TYRES propose une large gamme de pneumatiques (figure I.3) adaptés à différents types de véhicules. Chaque modèle est conçu pour répondre aux besoins spécifiques des conducteurs et aux conditions de conduite les plus variées [1].

- **IRIS ECORIS** : pneu haut de gamme pour véhicules de petite et moyenne taille, offrant un confort optimal, une bonne adhérence et une réduction de la consommation de carburant, sans compromis sur la sécurité.
- **IRIS SEFAR** : spécialement conçu pour voitures de taille moyenne, il allie performance, confort et sécurité, avec une longue durée de vie, un roulement silencieux et une stabilité accrue.
- **IRIS STORMY** : pneu robuste pour véhicules utilitaires, garantissant une excellente tenue de route et maîtrise quelles que soient les conditions météorologiques, avec adhérence, durabilité et économie de carburant.
- **IRIS AURES** : adapté aux SUV (Sport Utility Vehicle) et 4x4, il assure une conduite stable et sécurisée sur tous types de terrains et saisons, avec une bonne absorption des chocs.
- **IRIS LANE** : destiné aux véhicules utilitaires légers et camionnettes, ce pneu combine résistance élevée, performances toutes saisons et un excellent rapport qualité/prix.



Figure I.3 : Gamme de Produits de l'entreprise [1]

I.3 Caractéristiques techniques et constitution du pneu

I.3.1 Définition du pneu

Un pneu, abrégé de bandage pneumatique, par renvoi au bandage plein, est un objet à l'état solide, souple, de grandeur torique familiarisé de gomme et différentes matériaux textiles ou métalliques. Il est conçu pour être monté sur la jante d'une roue et gonflé avec un gaz sous pression, souvent de l'air ou de l'azote. Il assure le contact de la roue avec le sol, procurant une certaine adhérence, un amortissement des chocs et des vibrations facilitant ainsi le déplacement des véhicules terrestres [2].

I.3.2 Composants du pneu

Le pneu est un assemblage complexe de différentes couches (Figure I.4), chacune ayant un rôle bien défini pour garantir ses performances, sa robustesse et sa sécurité [2] :

- **Tread (bande de roulement)** : Partie extérieure du pneu, en contact direct avec la route. Elle assure une bonne adhérence, une résistance à l'usure et une évacuation efficace de l'eau grâce à ses rainures.
- **Belt Edge Strip (bande de renfort des ceintures)** : Située aux extrémités des nappes de ceintures, elle renforce la structure du pneu et empêche la séparation des couches sous les contraintes.
- **Steel Belts (ceintures en acier)** : Deux couches de fils d'acier qui renforcent la structure, augmentent la durabilité du pneu et améliorent sa stabilité à haute vitesse.
- **Nylon Belt (ceinture en nylon)** : Placée au-dessus des ceintures en acier, elle renforce le pneu face aux sollicitations mécaniques et limite sa déformation à grande vitesse.
- **Cap & Base (couche de roulement et sous-couche)** :
  - **Cap** : Partie externe de la bande de roulement, faite d'un caoutchouc très résistant à l'usure.
  - **Base** : Couche située sous la Cap, qui lie cette dernière aux ceintures en acier.
- **Innerliner (revêtement intérieur)** : Couche en caoutchouc spécial qui agit comme une chambre à air interne, maintenant la pression et évitant les fuites.

- **Body Plies (nappes carcasses)** : Composées de textiles ou de fils métalliques, elles apportent au pneu sa souplesse, sa solidité et sa capacité à absorber les chocs.
- **Sidewall (flanc du pneu)** : Partie latérale du pneu, elle protège la structure interne, absorbe certains impacts et affiche les informations importantes (dimensions, marque, indice de vitesse…).
- **Apex** : Élément en caoutchouc situé entre les nappes carcasses et le talon, il rigidifie le flanc et améliore la tenue de route.
- **Bead (talon)** : Fait de fils d'acier enrobés de caoutchouc, il fixe solidement le pneu à la jante, même sous forte pression ou forte charge.
- **Rim Cushion** : Renfort situé au niveau du talon, il amortit les vibrations et réduit les contraintes entre la jante et le pneu, améliorant le confort et la longévité.
- **Insulation (isolation)** : Couche interne protégeant les nappes contre la chaleur générée par les frottements, ce qui prolonge la durée de vie du pneu.

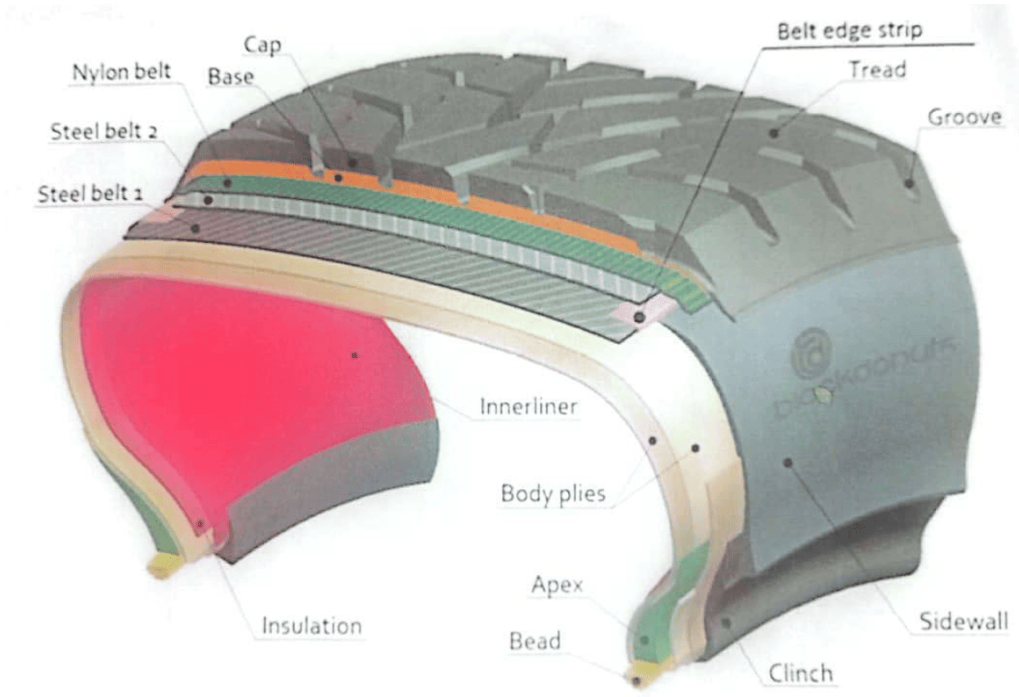


Figure I.4 : Composants du pneu [2]

I.4 Processus de fabrication des pneus

IRIS TYRES est organisé en trois départements, A, B et C (figure I.5), chacun dédié à une étape précise de la fabrication des pneus.

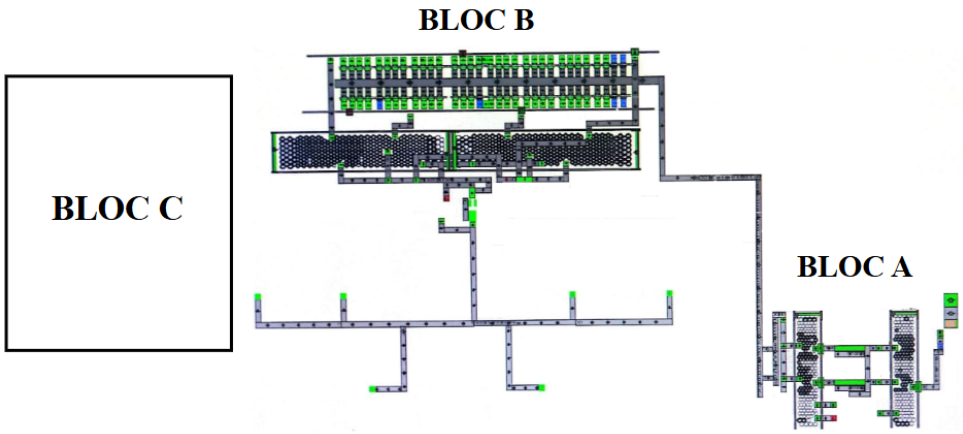


Figure I.5 : BUILDING A ET B [2]

I.4.1 Bloc C : Département des mélanges

Le bloc C, chargé de la préparation des matières premières, est divisé en trois zones spécialisées et dispose d'un laboratoire de recherche et développement dédié à l'amélioration et au contrôle de la qualité des mélanges.

I.4.1.1 Zone de Préparation des Ingrédients

Cette zone (figure I.6) est chargée de la pesée et du dosage des composants nécessaires à la formulation du caoutchouc. L'usine utilise un système automatisé, le «Color-System», qui assure une pesée précise des petits produits chimiques. Ce procédé optimise la préparation en ensachant, désensachant et livrant automatiquement les ingrédients au mélangeur, sans intervention humaine [1][2].

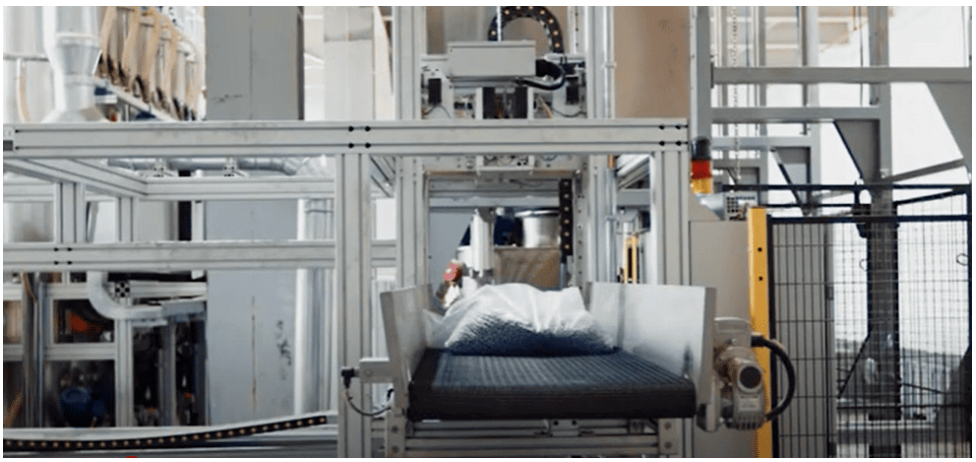


Figure I.6 : Zone de Préparation des Ingrédients [1]

I.4.1.2 Zone de mélange (Mixage des matières premières)

Cette zone (figure I.7) comprend deux malaxeurs, «Master» et «Final», chacun équipé de deux moteurs Siemens en mode maître-esclave, couplés à un réducteur à deux vitesses pour éviter le blocage de la matière. Le mélange inclut le caoutchouc, le noir de carbone et la silice

(transportés par air comprimé depuis les silos), ainsi que des additifs chimiques incorporés selon des recettes précises, assurant un mélange homogène et de qualité. La matière est ensuite calandrée sous forme de feuille, refroidie dans un tunnel contenant une matière anti-tags pour éviter le collage, pliée, puis stockée par un robot mobile SWISSLOG dans la zone de stockage [1][2].



Figure I.7 : Zone de mélange des matières premières [1]

I.4.1.3 Zone de stockage

Le stockage de la matière issue de la zone de mélange est assuré par un robot mobile SWISSLOG, contrôlé par un automate ALLEN BRADLEY et intégré via le logiciel WCS (Warehouse Control System) (figure I.9). Les matières premières sont stockées selon leur nature : le caoutchouc, le noir de carbone et la silice sont conservés dans de grands silos et transférés par un système pneumatique, tandis que les agents chimiques, reçus en conteneurs, sont organisés par le système SWISSLOG selon la méthode FIFO (First In, First Out) (figure I.8) [1][2].



Figure I.8 : Stock des matières premières [1]



Figure I.9 : Stock après le mixage [1]

I.4.1.4 Laboratoire de recherche et développement

Ce laboratoire (figure I.9) assure le contrôle qualité des matières premières et des mélanges via des tests internes garantissant leur conformité et fiabilité. Il joue aussi un rôle clé dans l'élaboration des recettes spécifiques aux pneus IRIS, contribuant à l'optimisation continue du processus de production [1].

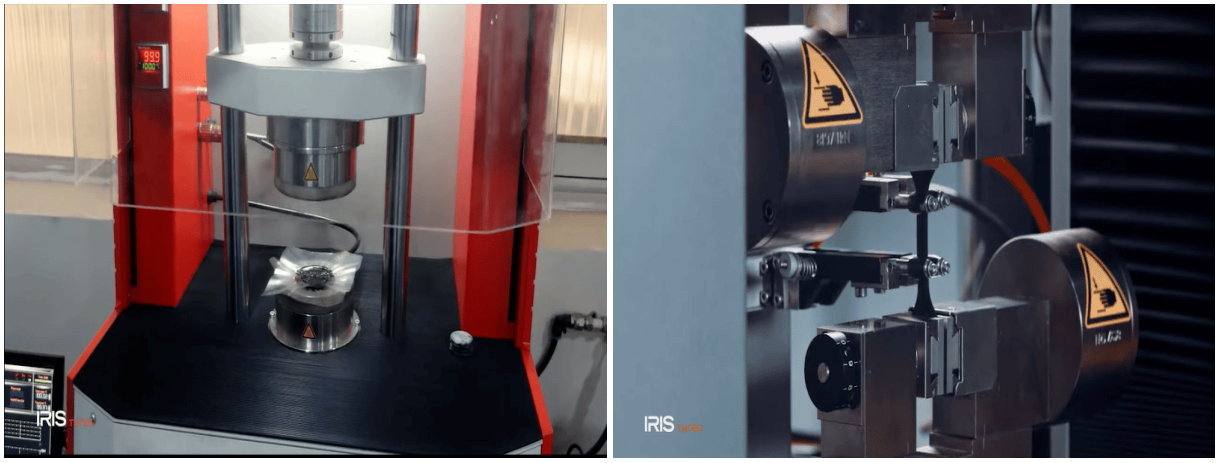


Figure I.10 : Laboratoire de recherche et développement [1]

I.4.2 Bloc B : Département des Composants

Également connu sous le nom de « Component Department », ce bloc (figure I.9) est réparti sur deux étages, chacun dédié à une phase spécifique de la fabrication des composants du pneu.

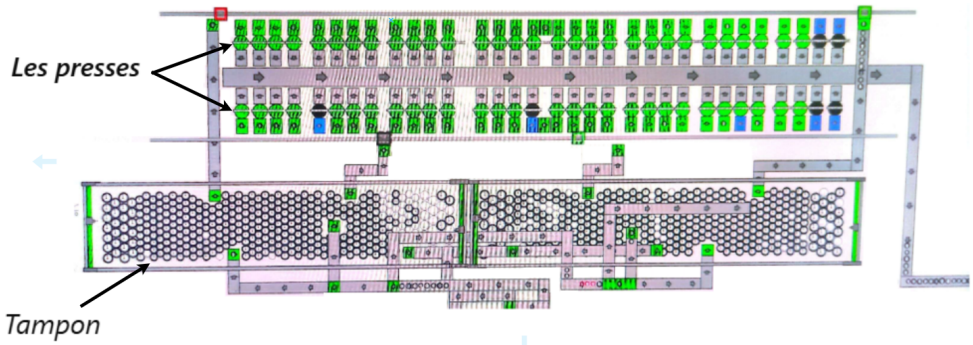


Figure I.11 : Bloc B [2]

I.4.2.1 Premier étage : Préparation des composants

Cet étage regroupe plusieurs machines chargées de transformer les matières premières issues du département des mélanges en composants prêts à être assemblés dans les pneus. On y retrouve les équipements suivants [2] :

- **Qwinto-plex** : prépare le flanc (sidewall) et la bande de roulement (tread).
- **Innerliner** : produit les bandelettes destinées à la couche intérieure (inner liner).
- **Stelastic** : fabrique les triangles de renfort.
- **TPCS** : traite les nappes ceintures et réalise le calandrage (belt 01 et belt 02).
- **Spoulex** : produit les nappes textiles (body ply).
- **Comerio** : confectionne les bandages d'acier et l'apex (cap strip).

I.4.2.2 Deuxième étage : Assemblage des pneus verts

Cet étage est consacré à l'assemblage des pneus verts (non cuits). Il comprend six machines d'assemblage TBM (Tire Building Machines), fabriquées par le constructeur VMI. Ces machines permettent l'assemblage progressif des différents composants du pneu avant leur passage à la phase de vulcanisation. Une fois l'assemblage terminé, les pneus verts sont transportés vers la machine de peinture ILMBERGER pour application d'une couche de peinture. Ensuite, ils sont automatiquement stockés dans un système tampon avant d'être acheminés vers la presse de vulcanisation appropriée [1][2].

Étape 1 : Assemblage des pneus verts avec les machines TBM

Cette étape présente le processus d'assemblage des pneus verts à l'aide des machines TBM, composées de deux sections distinctes : TB side et CC side .

1. **Première machine : TB Side**

- Déroulement des composants initiaux du pneu (figure I.4)(tread, cap strip, belt 1 & 2) à partir des rouleaux d'alimentation.

- Passage de chaque composant par un servomoteur (figure I.13) qui ajuste la longueur et réalise une découpe précise selon les spécifications de chaque type de pneu.
- Assemblage progressif (figure I.12) par laminage et pressage pour assurer une adhérence optimale.
- Transport du matériau assemblé vers un cylindre central, qui commence à lui donner une forme cylindrique préliminaire.
- Un anneau de transfert (ring) récupère le cylindre et l'achemine vers la deuxième machine.

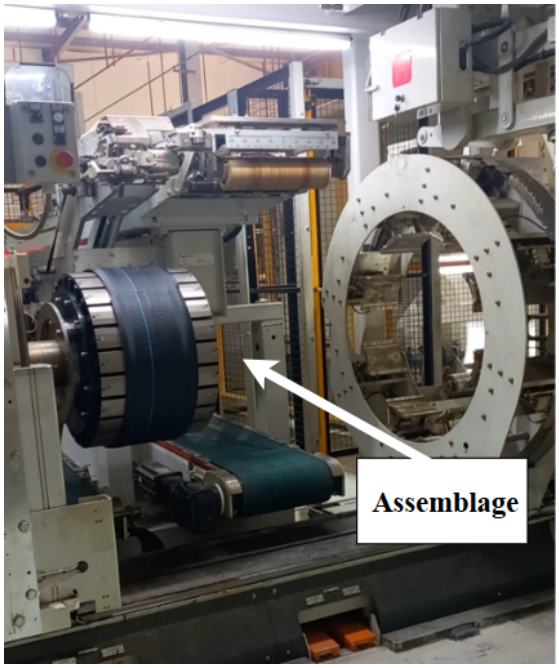


Figure I.12 : La machine TB Side [3]

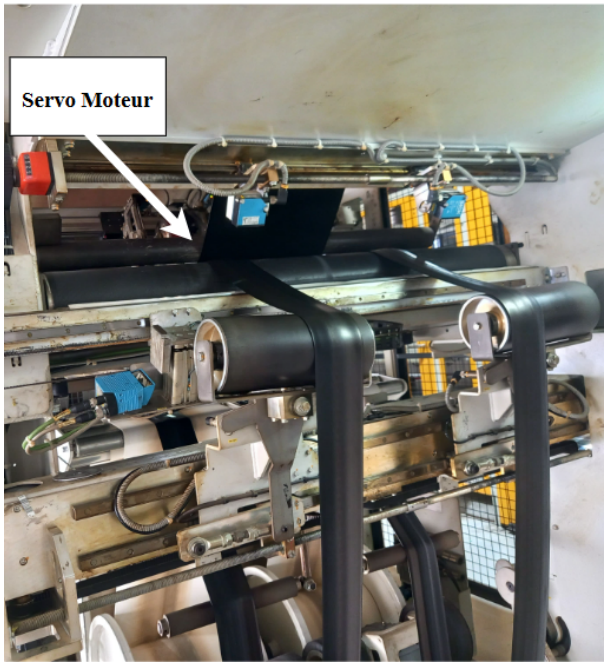


Figure I.13 : Servomoteur [3]

2. **Deuxième machine : CC Side**

- Réception du cylindre préliminaire pour l'ajout des éléments latéraux.
- Déroulement et positionnement des flancs (sidewall), de la couche interne (inner liner), des nappes textiles (body ply 1 & 2) et de l'apex sur la structure.
- Découpe précise des composants latéraux grâce à un servomoteur, adaptée aux dimensions du pneu.
- Application et pressage des flancs et de la couche interne pour garantir une adhérence parfaite.
- Phase de gonflage (figure I.14) pour stabiliser la structure et assurer la géométrie du pneu vert.

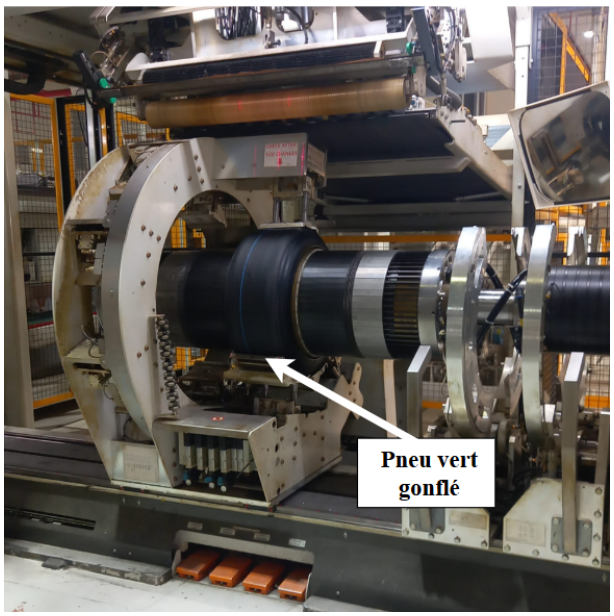


Figure I.14 : La machine CC Side [3]

Étape 2 : Application de peinture sur pneus verts (Machine ILMBERGER)

- Transport des pneus verts vers la peinture ILMBERGER (figure I.16) par convoyeur.
- Un scanner QR identifie le type de pneu avant l'entrée dans la machine (figure I.15).
- Application automatique de peinture, dosée entre 15 et 20 grammes selon le type de pneu.
- Si la lecture du QR code échoue, le pneu vert entre dans la machine sans être peint. À la sortie, un vérin pneumatique s'ouvre pour l'évacuer vers un convoyeur dédié.
- Un opérateur effectue ensuite une vérification manuelle et décide si le pneu vert est considéré comme scrap ou non.
- Les pneus verts correctement peints poursuivent leur trajet jusqu'à la station de stockage.



Figure I.15 : Caméra QR [3]



Figure I.16 : Machine ILMBERGER [3]

Étape 3 : Tampon de stockage et EMS (CIMCORP)

- Stockage automatisé des pneus verts dans un système tampon (figure I.17) fonctionnant selon la méthode FIFO.
- Lorsqu'une presse de vulcanisation nécessite un pneu, une grue tampon le livre au point de ramassage.
- Le système EMS (figure I.18) (géré par un automate ALLEN-BRADLEY) transfère ensuite le pneu vers la presse de vulcanisation appropriée.



Figure I.17 : Système tampon [3]



Figure I.18 : Système EMS [3]

I.4.3 Bloc A : Inspection et Contrôle Qualité des Pneus

Après leur passage par le Bloc B, les pneus sont transférés vers le Bloc A (figure I.19), dédié à leur contrôle final. Ce bloc regroupe plusieurs étapes essentielles visant à garantir la conformité des produits avant leur mise sur le marché.

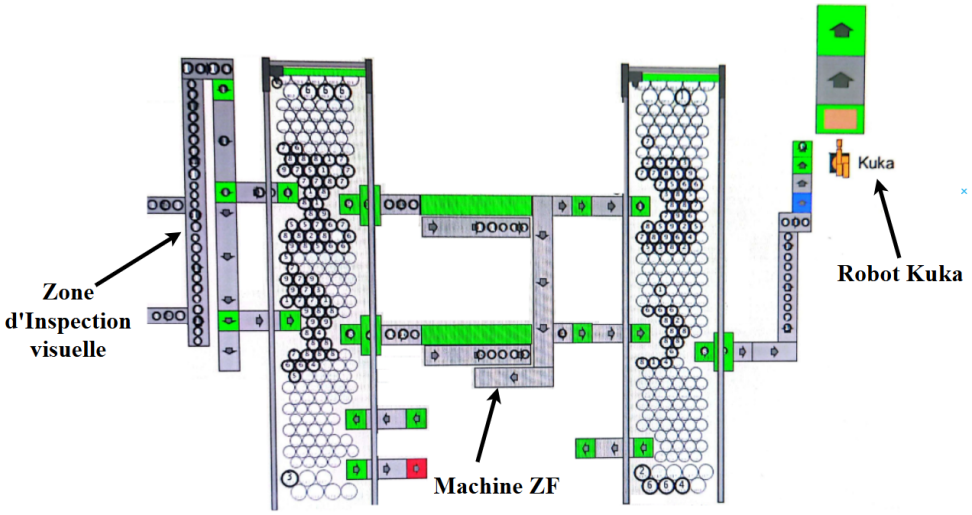


Figure I.19 : Bloc A [2]

I.4.3.1 Inspection Visuelle et Enregistrement

Chaque pneu est inspecté visuellement par un agent de contrôle (figure I.20) afin de détecter d'éventuels défauts susceptibles de compromettre sa sécurité ou ses performances. L'agent scanne ensuite le code-barres et enregistre son évaluation dans le système de traçabilité [2]. Deux cas peuvent alors se présenter :

- **Pneu conforme** : il est validé et transféré à l'étape suivante via un convoyeur.
- **Pneu défectueux** : il est marqué comme «scrap» et mis au rebut.



Figure I.20 : Inspection Visuelle [3]

I.4.3.2 Suivi des Décisions et Assurance Qualité

Le système de traçabilité (figure I.21) enregistre et vérifie les décisions des opérateurs . En cas de mauvaise classification en "scrap", une analyse identifie l'origine de l'erreur. Si un pneu validé présente un défaut, l'opérateur responsable est identifié pour renforcer le contrôle. Des erreurs répétées entraînent des formations ou des ajustements de procédure [2].

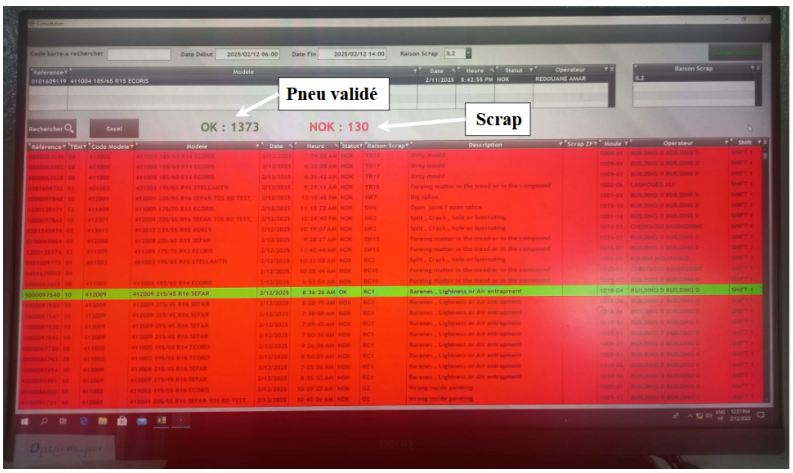


Figure I.21 : Interface de Suivi des Décisions [3]

Cela met en évidence les limites de l'inspection visuelle, dépendante de l'opérateur, tant en termes de temps d'exécution que de fiabilité. D'où la nécessité d'une solution d'inspection automatique des pneus, abordée dans le cadre du **MFE**.

I.4.3.3 Contrôle Qualité Automatisé via la Machine ZF

Après l'inspection manuelle, les pneus sont soumis à une série de contrôles automatisés dans la machine ZF [2].

Étape 1 : Centralisation du Pneu

Le pneu est tout d'abord acheminé par convoyeur jusqu'à une station de centrage automatique (figure I.22). Des capteurs détectent sa position et déclenchent l'alignement, assuré par deux mécanismes complémentaires :

- des butées mobiles et des plaques latérales garantissent un centrage optimal,
- des capteurs optiques ou lasers valident précisément la position du pneu avant le lancement des tests.



Figure I.22 : Centralisation du Pneu [3]

Étape 2 : Tests de Contrôle Qualité

1. **Équilibrage Dynamique (Balancing)** : Le pneu est ensuite monté sur un axe rotatif et mis en rotation. Des capteurs détectent les éventuels déséquilibres et calculent la masse du contre-poids à ajouter pour garantir une répartition homogène. Un marquage est enfin effectué sur le pneu afin de faciliter son équilibrage lors du montage final sur le véhicule.

2. **Uniformité (Uniformity)** : Le pneu gonflé est soumis à un rouleau qui simule les conditions de contact avec la chaussée. Durant ce test, trois types de forces sont mesurées : la force radiale (RFV), la force latérale (LFV) et la force tangente (TFV). Si l'une de ces valeurs dépasse les seuils tolérés, le pneu est automatiquement rejeté ou orienté vers une reprise.

Étape 3 : Inspection par Capteurs UV

Après les tests mécaniques, le pneu subit une inspection optique par capteurs UV, permettant d'identifier des défauts invisibles à l'œil nu (figure I.23). Cette phase comprend notamment :

- Détection des microfissures par lumière UV.
- Contrôle d'étanchéité par injection de gaz pour détecter les porosités.
- Vérification du collage interne via les réactions des adhésifs sous UV.
- Détection de corps étrangers (métaux, résidus) réagissant à la lumière UV.



Figure I.23 : Tests de Contrôle et Inspection par Capteurs UV [1]

I.4.3.4 Test de Force

Ce test vérifie la résistance mécanique du pneu en simulant des conditions réelles. Le pneu est fixé sur un tambour rotatif imitant une route, où deux forces sont mesurées : la force radiale, correspondant aux déformations verticales, et la force latérale, liée à la stabilité directionnelle. Ce procédé identifie les défauts d'uniformité tels que vibrations ou décalages. À la fin, le pneu est validé, ajusté ou mis au rebut, et les résultats sont enregistrés [1][2].

I.4.3.5 Étiquetage et Stockage

Une fois les pneus validés, ils sont dirigés vers la station d'étiquetage puis stockés [1][2].

Étape 1 : Étiquetage Automatisé

Les pneus arrivent par tapis roulant à la station d'étiquetage (figure I.24) où un capteur détecte leur position et déclenche l'apposition automatique de l'étiquette. Celle-ci comporte la marque, les dimensions, l'indice de performance, le niveau sonore, la consommation énergétique et l'adhérence. Un autre capteur vérifie ensuite la présence et la lisibilité de l'étiquette.



Figure I.24 : Étiquetage Automatisé des pneus [1]

Étape 2 : Stockage Robotisé

1. **Robot CIMCORP :** Le robot CIMCORP (figure I.25) saisit les pneus à l'aide d'une ventouse ou d'une pince, puis les stocke en optimisant l'espace selon leur type et leur taille.
2. **Robot KUKA :** Le robot KUKA (figure I.26) transfère les pneus de la zone de tri vers la zone principale de stockage.
3. **Système de gestion de stock :** Le système de gestion de stock (figure I.27) assure une mise à jour en temps réel et facilite la préparation des expéditions futures.



Figure I.25 : Robot CIMCORP [1]

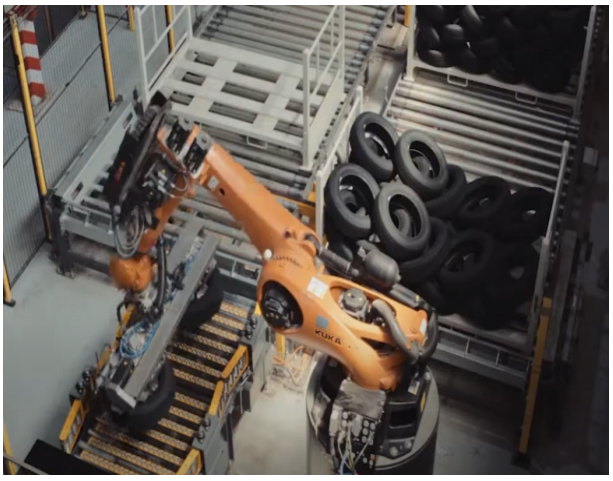


Figure I.26 : Robot KUKA [1]



Figure I.27 : Stock des pneus finis [1]

I.5 Description et principe de fonctionnement de la presse de vulcanisation

Dans le cadre de ce travail portant sur la presse de vulcanisation, la présente section expose de manière approfondie le principe de fonctionnement de la presse située dans le Bloc B. Ce procédé vise à transformer le pneu vert, encore malléable, en un produit final.

I.5.1 Circuit de Vulcanisation des Pneus

Le processus de vulcanisation suit un circuit précis permettant de transformer le pneu vert en produit fini. Ce circuit comprend les étapes suivantes [1][2] (figure I.28) :

1. **Tampon de Stockage des Pneus Verts** : Les pneus verts prêts à être cuits sont temporairement stockés dans un tampon (figure I.28.1), en attente de traitement.

2. **Point de Ramassage EMS** : Le système EMS sélectionne les pneus selon le principe FIFO pour les préparer à l'acheminement vers les presses (figure I.28.2).

3. **Transport par EMS** : L'EMS se déplace sur rail et assure la livraison des pneus verts vers la presse assignée (Figure I.28.3).

4. **Position d'Attente de la Presse** : Le pneu est placé devant la presse, prêt à être introduit pour le processus de cuisson (figure I.28.4).

5. **Presse de Vulcanisation** : Le pneu est inséré dans la presse où il subit la vulcanisation, sous l'action combinée de la chaleur et de la pression (figure I.28.5).

6. **Déchargement du Pneu** : Une fois la cuisson terminée, le pneu est automatiquement retiré de la presse (Figure I.28.6).

7. **Convoyeur de Refroidissement** : Le pneu vulcanisé est transporté sur un convoyeur jusqu'à la station d'inspection visuelle (figure I.28.7).

I.5.2 Fonctionnement de la Presse de Vulcanisation

Le cœur du processus repose sur la presse de vulcanisation, machine spécialisée assurant la cuisson du pneu vert. Ce procédé déclenche une réaction chimique entre le caoutchouc et

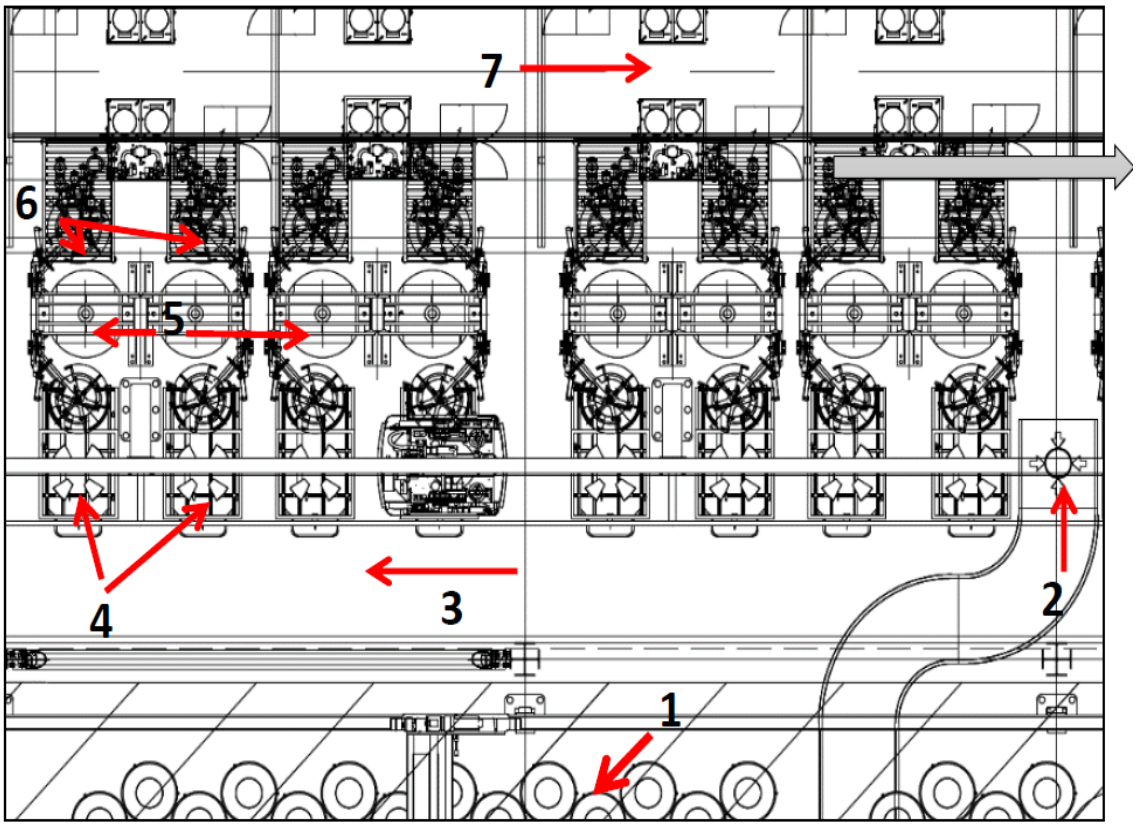


Figure I.28 : Les étapes de la partie cuisson [2]

les autres composants, conférant au pneu sa résistance, sa forme définitive et ses propriétés mécaniques.

I.5.3 Types de Presses

Dans l'industrie du pneumatique, deux principaux types de presses sont utilisés pour le processus de vulcanisation :

Presse mécanique : Elle utilise un système de genouillère permettant de maintenir le moule fermé pendant la cuisson (figure I.29).

Presse hydraulique : Fonctionnant à l'aide d'huile hydraulique et d'un mécanisme de verrouillage par culasse (figure I.30), elle est aujourd'hui la plus répandue dans l'industrie grâce à sa légèreté, sa précision et sa rentabilité.



Figure I.29 : Presse mécanique



Figure I.30 : Presse hydraulique

I.5.4 Équipements et Spécificités Techniques

La presse de vulcanisation présente les caractéristiques (figure I.31) suivantes :

- Double cavité avec contrôle indépendant des forces appliquées.
- Mouvement vertical pour l'ouverture et la fermeture des moules.
- Compatibilité avec les moules segmentés.
- Fonctionnement en mode bi-cavité selon les besoins.
- Système hydraulique à huile pour l'ensemble des opérations.
- Chargement et déchargement automatisés à l'aide de dispositifs de préhension.
- Mécanisme central de type double bagwell pour une meilleure répartition de la pression.

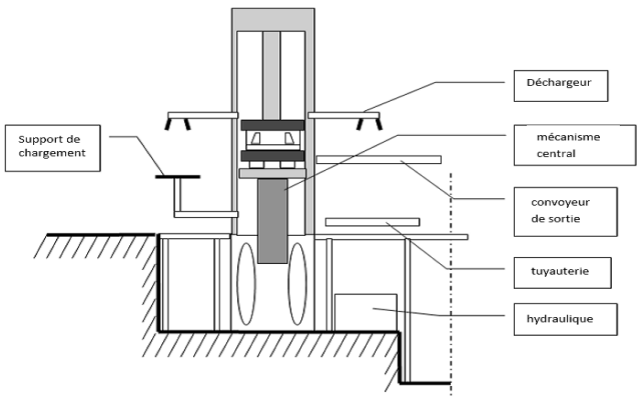


Figure I.31 : Les équipements de la presse

I.5.5 Cycle de Vulcanisation : Séquence Opérationnelle

Le cycle de vulcanisation est une suite d'opérations mécaniques et thermodynamiques parfaitement synchronisées, visant à transformer le pneu vert en produit fini. Ci-dessous, les étapes détaillées du cycle de cuisson [1][2] :

Étape 1 :Chargement Automatique du Pneu Vert

Le processus commence par l'introduction du pneu vert dans la presse à l'aide d'un système de chargement automatique. Ce système, muni d'un bras manipulateur (Figure I.32), saisit le pneu vert depuis la position d'attente pour le déposer dans le moule inférieur de la presse (Figure I.33). Une fois le pneu en place, une première pression, appelée pression de mise en forme 1 ("Hold"), est appliquée afin de le stabiliser dans le moule. En parallèle, la vessie de vulcanisation (Bladder), souple et résistante à la chaleur, se positionne à l'intérieur du pneu. Elle est ensuite gonflée progressivement à des pressions de 0,25 bar, 0,6 bar, puis 3 bar (Figure I.34), préparant ainsi la structure interne du pneu à une déformation contrôlée.

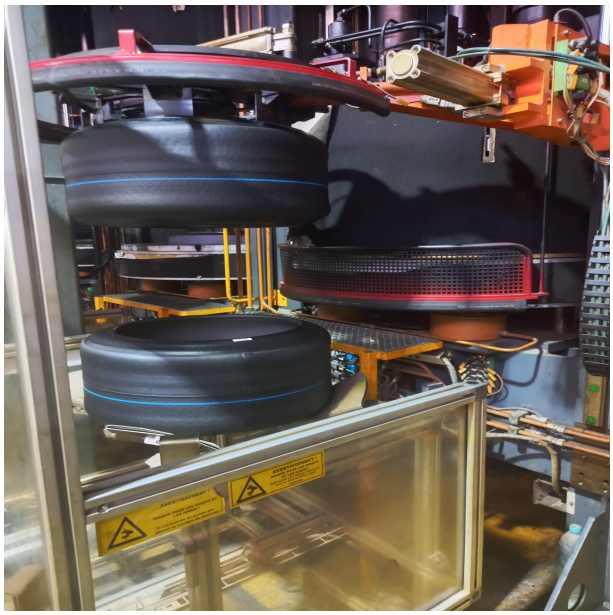


Figure I.32 : Chargement du pneu [3]

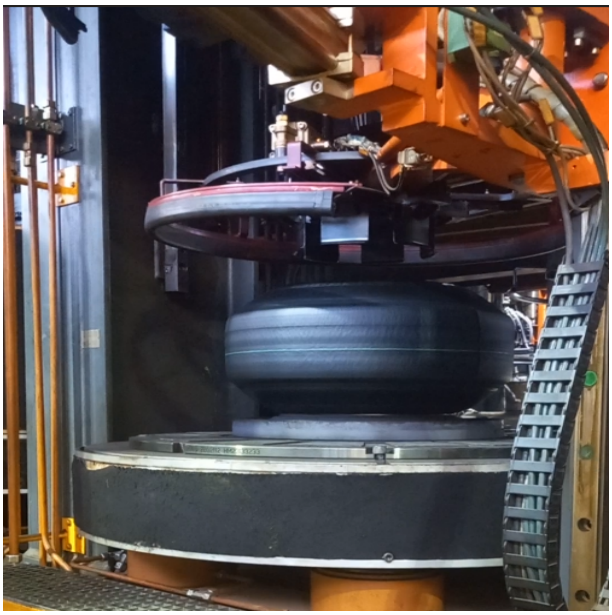


Figure I.33 : Dépôt du pneu dans la presse [3]



Figure I.34 : La position finale [3]

Étape 2 :Fermeture et Verrouillage du Moule

Après l'insertion du pneu, la presse se ferme progressivement (Figure I.35). Un ajustement précis est effectué afin que le segment supérieur du moule entre exactement en contact avec l'anneau supérieur, garantissant ainsi un alignement parfait. Ensuite, la pression de mise en forme 2 est activée pour achever la fermeture complète.
Durant cette phase, la position de la table (plateau de la presse) est cruciale : elle doit être calibrée de manière à permettre la fermeture des segments mobiles du moule vers l'intérieur, sans créer de contrainte mécanique excessive. Une fois les segments refermés, le moule est verrouillé mécaniquement (Figure I.36).

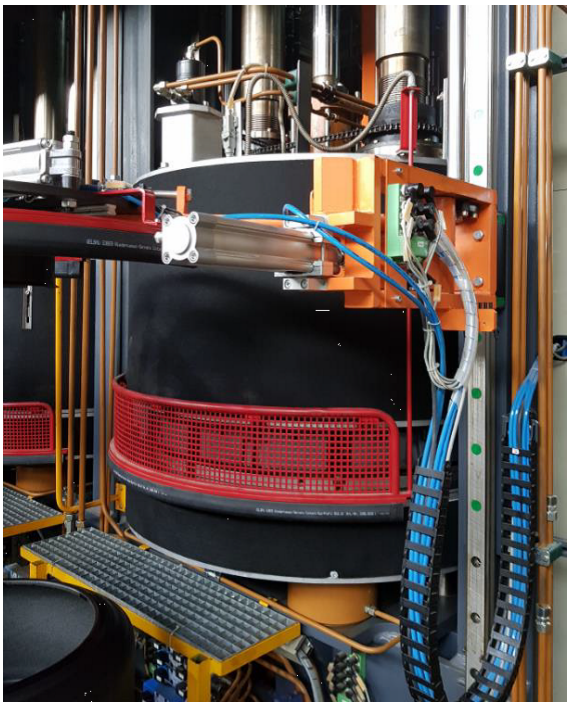


Figure I.35 : La presse commence à se fermer [3]



Figure I.36 : La presse fermée [3]

Étape 3 :Cuisson et Mise en Forme

La phase de vulcanisation commence par le gonflage progressif de la vessie interne (Bladder), alimentée en vapeur surchauffée en recirculation, assurant une transmission optimale de la chaleur au pneu. Sous l'effet combiné de la température de cuisson, de la pression de formage et de la force de serrage exercée par le moule, le pneu vert prend parfaitement la forme gravée du moule : dessin de la bande de roulement, inscriptions latérales, dimensions, etc. C'est durant cette étape que la réaction chimique de réticulation entre le caoutchouc et les agents vulcanisants s'opère, conférant au pneu ses propriétés mécaniques définitives : résistance, élasticité, étanchéité et tenue thermique.

Étape 4 :Phase de Refroidissement et Détente

Une fois le temps de vulcanisation écoulé, la pression interne est relâchée en plusieurs étapes via des vannes de décharge spécifiques. Cette phase de détente comprend trois sous-étapes :

1. **Première libération** : la vanne principale s'ouvre, libérant la majeure partie de la pression interne vers un réservoir de collecte par un conduit de drainage.
2. **Deuxième libération** : la pression restante est évacuée à travers une vanne secondaire, réduisant davantage la charge interne.
3. **Troisième libération** : une vanne à trois voies s'ouvre pour relier la vessie à un conduit de mise à l'air libre, ramenant le système à la pression atmosphérique.

Étape 5 :Ouverture de la Presse et Déchargement

Lorsque la pression est totalement relâchée, la presse s'ouvre automatiquement. Un système de déchargement automatisé intervient alors pour extraire le pneu vulcanisé du moule et le déposer sur un convoyeur (figure I.37). Ce dernier achemine le pneu vers l'unité de refroidissement (figure I.38), puis vers la station d'inspection visuelle, où sa conformité dimensionnelle et esthétique est vérifiée.



Figure I.37 : Déchargement du pneu [3]



Figure I.38 : Convoyeur de Pneus [3]

I.6 Problematique et solution

I.6.1 Problematique

Dans le processus de vulcanisation des pneus, la qualité finale du produit dépend étroitement de trois paramètres critiques : la pression de formage, la force de serrage du moule et la température de cuisson. Toutefois, la pression de formage et la force de serrage ne sont pas suffisamment maîtrisées, ce qui nuit à la performance globale du procédé et peut engendrer des défauts de fabrication.

La pression de formage (Shaping) joue un rôle essentiel dans le succès du cycle de cuisson. Elle permet de maintenir l'uniformité dimensionnelle du pneu, d'assurer une bonne adhésion entre les différentes couches, tout en garantissant un transfert thermique efficace entre le moule chauffant et le pneu brut. Toutefois, ce paramètre est sujet à d'importantes variations dynamiques, notamment en raison des changements de type de pneu, de l'usure des moules, des fuites d'air ou des variations de pression dans le réseau, ainsi que de l'inertie pneumatique qui entraîne des retards de réponse, des dépassements de consigne et des instabilités. Un PID à gains fixes ne parvient pas à gérer efficacement ces dynamiques complexes, d'où la nécessité d'un contrôleur intelligent.

La force de serrage (Squeeze) est tout aussi cruciale, car elle assure la fermeture hermétique du moule malgré les pressions internes élevées, prévient les défauts tels que les bavures de moulage (flashing) (figure I.39), et permet une compression uniforme des couches, condition essentielle à une bonne adhésion et à l'élimination des bulles d'air (figure I.40). Actuellement, cette force est réglée de manière manuelle et fixe, sans régulation automatique, ce qui entraîne des variations d'un cycle à l'autre et des défauts difficilement détectables.

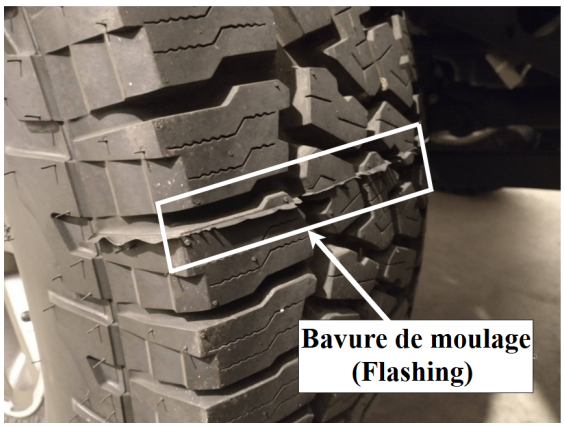


Figure I.39 : Interface de Suivi des Décisions

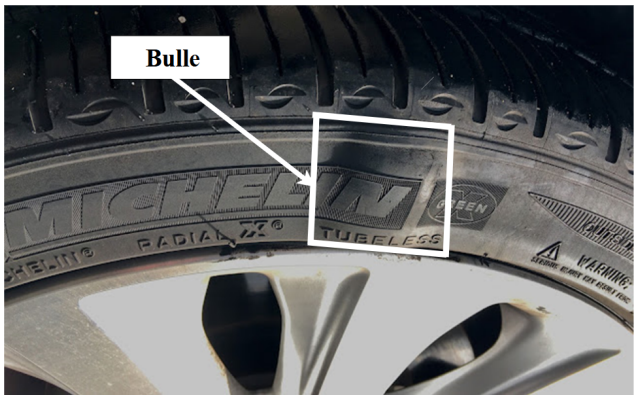


Figure I.40 : Interface de Suivi des Décisions

Les dysfonctionnements liés au contrôle instable de la pression de formage provoquent des dépassements de consigne ainsi qu'une instabilité de la force de compression. Ces défaillances engendrent des défauts de cuisson, avec des zones non vulcanisées ou, au contraire, surcompressées, une baisse de la qualité, et un taux de rebut pouvant atteindre 25 % par shift de huit heures.

Par ailleurs, l'IHM actuelle présente plusieurs limites. Lorsqu'un type de pneu différent est commandé, l'opérateur modifie manuellement la recette et place une fiche papier devant chaque presse (figure I.41). Ce manque d'automatisation dans le changement de recettes expose le processus à un risque élevé d'erreurs humaines.

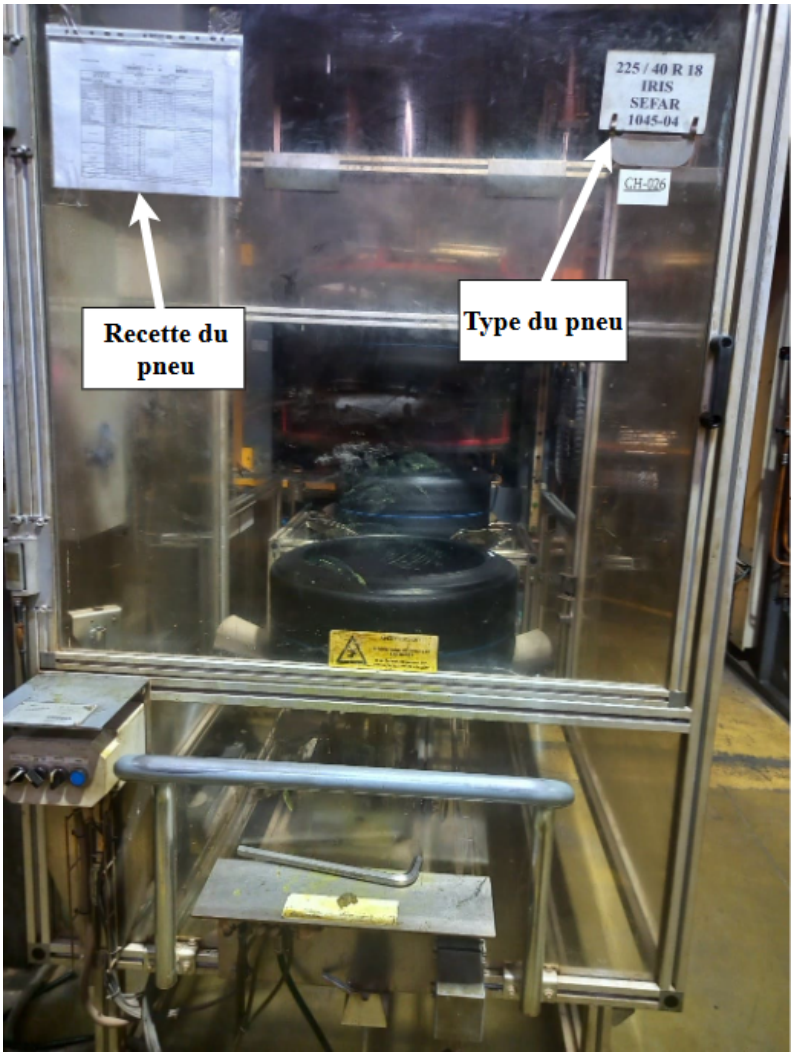


Figure I.41 : Interface de Suivi des Décisions [3]

Le système SCADA en place présente également de nombreuses limitations. Son interface, uniquement disponible en langue chinoise, complique son utilisation par le personnel local et impose une dépendance aux techniciens étrangers pour la maintenance. De plus, il ne propose aucun accès distant sécurisé et repose sur une architecture propriétaire fermée, peu flexible et difficile à faire évoluer.

I.6.2 Solutions Proposées

Face aux constats précédemment évoqués, plusieurs solutions techniques sont envisagées pour améliorer le processus de vulcanisation.

Pour la pression de formage, un régulateur PID flou adaptatif sera mis en œuvre afin de s'ajuster dynamiquement aux perturbations. En ce qui concerne la force de serrage, un régulateur PID classique sera adopté afin de garantir un contrôle fiable et précis.

En parallèle, une nouvelle interface homme-machine (IHM) sera développée. Elle permettra la visualisation et la sélection des recettes selon la gamme de pneus, l'affichage en temps réel des grandeurs régulées telles que la pression, la force et la température, ainsi que le pilotage manuel ou automatique des équipements tels que la presse, le chargeur et le déchargeur. Elle intégrera également la gestion des alarmes et des compteurs de production.

Enfin, un nouveau système SCADA moderne, basé sur une architecture Web, sera conçu. Il offrira une interface en anglais, simple et intuitive, un accès distant sécurisé depuis différents supports (PC, tablette, smartphone), une communication standardisée via OPC UA, ainsi que des visualisations interactives incluant des courbes de tendance, des alarmes et des historiques.

Les améliorations attendues sont significatives avec une réduction du taux de rebut, une amélioration de la qualité, une stabilité des cycles de cuisson et une augmentation notable de la productivité et du rendement. Ce projet revêt également une importance stratégique pour l'Algérie. Conduit dans la seule usine de pneumatiques du pays, IRIS Tyres, il favorisera la montée en gamme vers des produits conformes aux standards internationaux, contribuera à la réduction des importations, renforcera la souveraineté industrielle nationale, et participera activement au développement des compétences locales en automatisation et régulation avancée.

I.7 Conclusion

Ce chapitre a établi une vue d'ensemble rigoureuse de l'environnement industriel d'IRIS Tyres, en détaillant le processus de fabrication des pneus et en mettant l'accent sur le rôle central de la presse de vulcanisation. L'analyse des étapes critiques, notamment le contrôle de la pression de formage et de la force de serrage, a permis d'identifier les limitations techniques actuelles affectant la qualité de production. Par ailleurs, les lacunes relevées dans les systèmes IHM et SCADA en place soulignent la nécessité d'une modernisation de l'architecture de contrôle. Ces constats justifient pleinement les orientations technologiques proposées dans ce projet, en vue d'optimiser la performance, la traçabilité et la compétitivité du processus industriel.

Afin de mieux comprendre l'architecture proposée pour répondre à ces défis, le chapitre suivant présente en détail les éléments matériels et logiciels du système automatisé mis en œuvre dans ce projet.

Chapitre II

Description du Système Automatisé et des Logiciels Utilisés

II.1 Introduction

Ce chapitre introduit les composants matériels et logiciels du système automatisé de vulcanisation. Il décrit les trois parties principales : opérative, pupitre et commande. Cette dernière est détaillée à travers l'automate Siemens S7-1500, les modules ET200SP et l'interface TP900 Comfort. Sont également présentés les outils logiciels, notamment TIA Portal pour la programmation et le protocole OPC UA pour la communication industrielle. L'ensemble met en lumière l'organisation et l'interconnexion des composantes, ainsi que leur rôle complémentaire dans le contrôle, la supervision et l'optimisation du processus.

II.2 Architecture fonctionnelle du système automatisé

Un système automatisé est une organisation technique combinant des équipements matériels et logiciels permettant de contrôler un processus industriel sans intervention humaine continue. Le système automatisé étudié se compose de trois parties principales(Figure II.1) :

- **Partie Opérative (PO)** : Elle regroupe l'ensemble des éléments intervenant directement dans le procédé, assurant l'exécution physique des actions sur le terrain. Elle comprend notamment les capteurs, les moteurs, les vérins, les actionneurs et les distributeurs.
- **Partie Commande (PC)** : Elle constitue le centre de commande du système automatisé. Cette fonction est assurée par un automate programmable industriel (API) qui collecte les données issues des capteurs, exécute le programme de contrôle, puis commande les actionneurs en fonction des résultats obtenus.
- **Partie Pupitre (PP)** : Elle assure l'interface entre l'opérateur et le système automatisé, permettant la supervision des états et le contrôle des différentes fonctions du processus via une interface homme-machine.

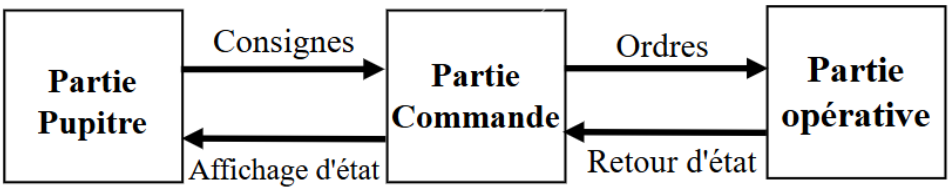


Figure II.1 : Les parties d'un système automatisé

II.3 Éléments de la partie opérative :

II.3.1 Les capteurs :

Les capteurs (Figure II.2)sont des dispositifs permettant de recueillir des informations sur l'état ou l'évolution d'une grandeur physique (température, position, pression, etc.) et de les convertir en signaux exploitables par la partie commande du système automatisé [17].

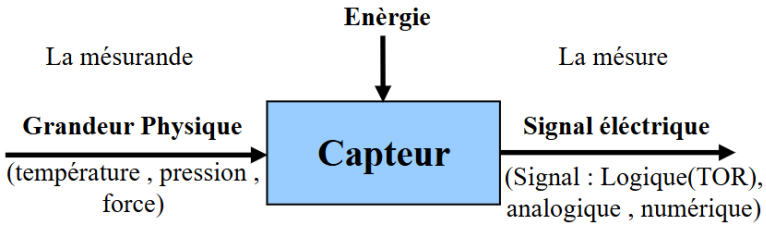


Figure II.2 : Principe de fonctionnement du capteur

1. **Capteur de pression :**
   Dispositif qui mesure la pression exercée par un fluide (gaz ou liquide) sur une surface et la transforme en un signal électrique exploitable par un système de commande [18].Dans le cadre de la presse de vulcanisation des pneumatiques, plusieurs capteurs de pression (Figure II.3) sont utilisés afin de mesurer avec précision la pression de shaping ainsi que la force de serrage, donnée par : $F = S \times P$, où F représente la force (en N), S la surface de contact (en m²) et P la pression mesurée (en Pa).



Figure II.3 : Capteur de pression [4]

.

2. **Pressostat :**
   Dispositif (Figure II.4) qui permet de détecter une pression prédéfinie dans un système et de déclencher un contact électrique lorsque cette pression est atteinte ou dépassée. Il sert principalement à commander, réguler ou sécuriser des installations en automatisme industriel en fonction des variations de pression [19].



Figure II.4 : Pressostat [5]

3. **Capteur de température Pt100 :**

   Capteur de température à résistance électrique fabriqué en platine (Figure II.12), dont la résistance varie de manière précise et linéaire avec la température. Le chiffre ”100” indique que sa résistance est de 100 ohms à 0°C [20]. La presse est équipée de capteurs de température Pt100, utilisés pour mesurer la température du plateau, des segments, de l’huile, etc. (Figure II.5)



Figure II.5 : Capteur de température Pt100 [5]

4. **Thermostat :**

   Elément de régulation qui permet de maintenir une température constante dans un système en détectant la température ambiante et en activant ou désactivant un équipement de chauffage ou de refroidissement selon une consigne définie [21]. Les thermostats (Figure II.6) sont utilisés pour surveiller et ajuster la température des éléments chauffants de la presse (plateaux, segments, huile) afin de maintenir des conditions thermiques stables tout au long du cycle de production.

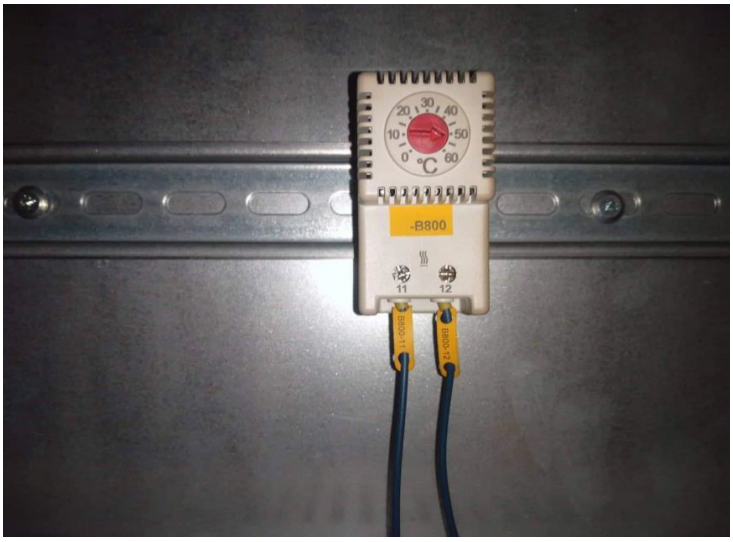


Figure II.6 : Thermostat [3]

5. **Encodeur linéaire à effet Hall :**

Capteur de position linéaire qui utilise l'effet Hall pour détecter un champ magnétique et convertir un déplacement linéaire en un signal électrique, permettant ainsi de mesurer précisément la position d'un élément mobile sans contact mécanique [22]. Dans le contexte de la presse , l'encodeur linéaire à effet Hall (Figure II.7) est utilisé pour mesurer précisément le déplacement des vérins et des plateaux mobiles.



Figure II.7 : Ecodeur linéaire [6]

6. **Capteur de proximité inductif :**

Capteur qui détecte la présence d'objets métalliques sans contact en générant un champ électromagnétique et en mesurant les variations de ce champ causées par l'approche d'un objet métallique [23].Ce capteur (Figure II.9) sert à contrôler la position des pièces métalliques mobiles, telles que les vérins ou les plateaux.

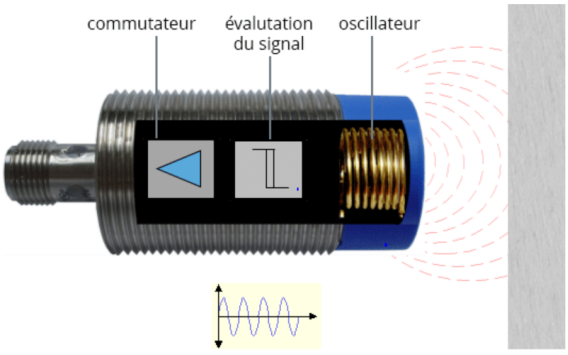


Figure II.8 : Principe de fonctionnement du Capteur de proximité inductif [7]



Figure II.9 : Capteur de proximité inductif [7]

7. **Capteur pneumatique de sécurité (Safety) :**
   Capteur pneumatique de sécurité (Figure II.10) est un dispositif de détection utilisant la pression d'air pour surveiller l'état de sécurité d'un système pneumatique, assurant l'arrêt ou la protection en cas de conditions anormales .

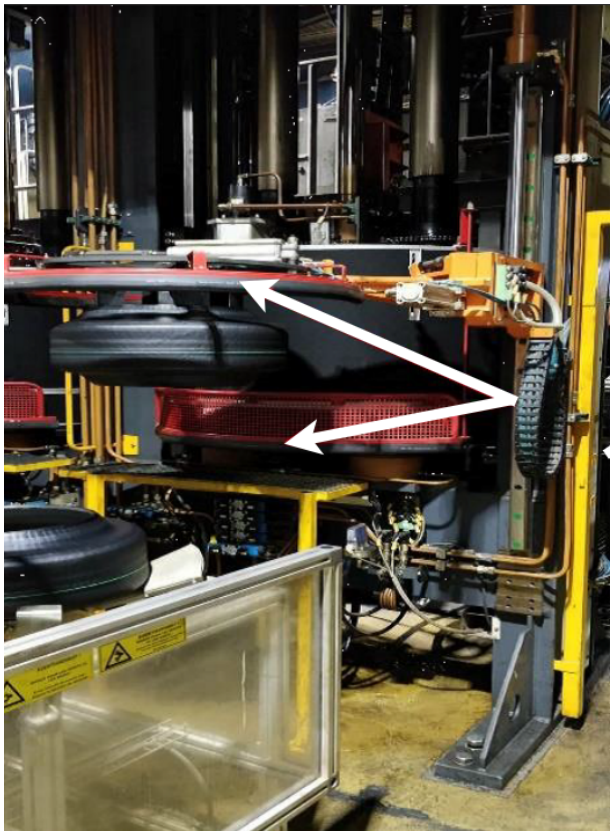


Figure II.10 : Capteur pneumatique de sécurité [3]

8. **Capteur photoélectrique :**

   Capteur qui détecte la présence ou l'absence d'un objet en utilisant un faisceau lumineux infrarouge ou visible, et mesure la variation de la lumière reçue pour générer un signal électrique [24].Ce capteur (Figure II.12 et II.11) permet de détecter la présence ou l'absence d'un pneu vert dans la zone de chargement de la presse.



Figure II.11 : Capteur photoélectrique [7]

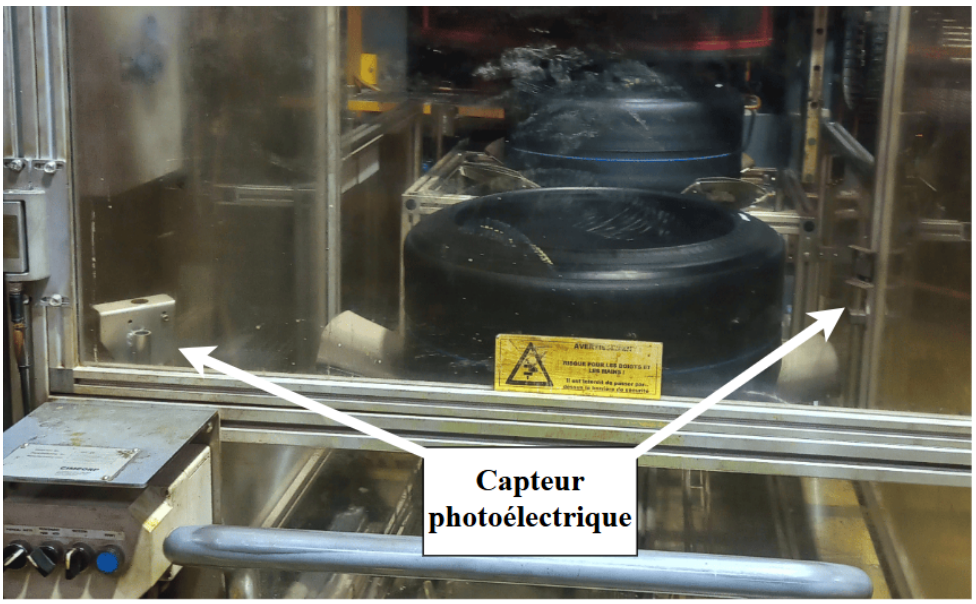


Figure II.12 : Capteur photoélectrique dans presse [3]

II.3.2 Les pré-actionneurs :

dispositifs intermédiaires entre la partie commande et les actionneurs, tels que les relais, contacteurs ou distributeurs pneumatiques et hydrauliques, permettant de commander indirectement les actionneurs à partir des signaux faibles issus de l'automate [25] . (Figure II.13)

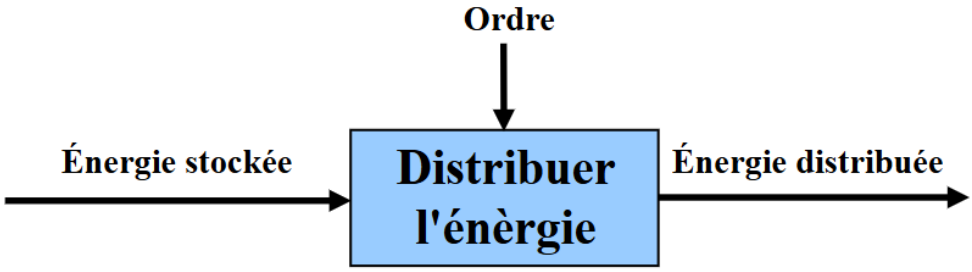


Figure II.13 : Principe de fonctionnement du pré-actionneur

1. **Distributeur pneumatique :**

Distributeur pneumatique (Figure II.14) est un organe de commande permettant de diriger l'air comprimé vers les différents éléments d'un circuit pneumatique, en fonction des signaux de commande. Il agit comme un commutateur pour contrôler le sens de déplacement des vérins ou l'alimentation d'autres composants. Les distributeurs peuvent être actionnés mécaniquement, électriquement, pneumatiquement ou manuellement [26].

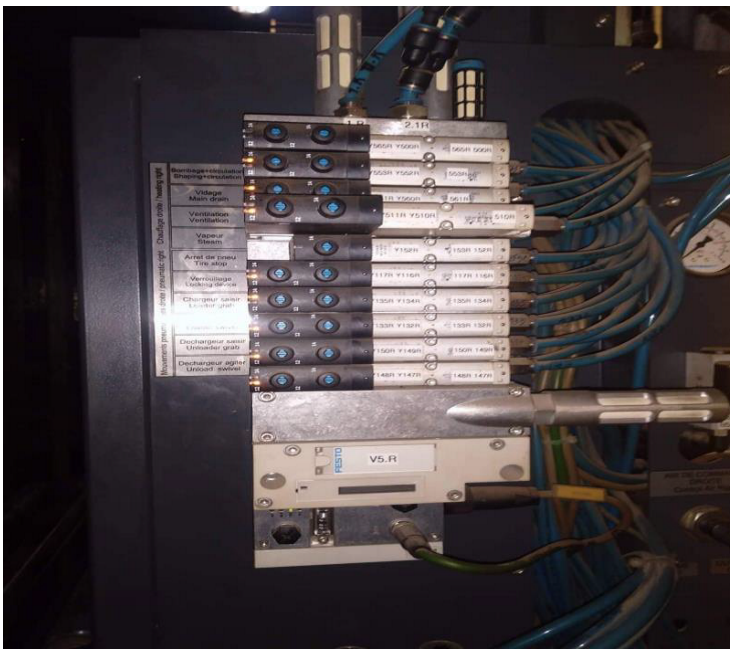


Figure II.14 : Distributeur pneumatique [3]

2. **Distributeur hydraulique :**

Distributeur hydraulique (Figure II.15) est un organe de commande qui permet d'orienter et de contrôler la circulation du fluide dans un circuit hydraulique. Il dirige le débit vers les différents éléments (vérins, moteurs hydrauliques) selon la position de son tiroir. Il peut être à commande manuelle, électrique, pneumatique ou hydraulique, et fonctionne en général selon plusieurs positions (2/2, 4/3, etc.) pour assurer les fonctions de mise en marche, arrêt ou inversion du mouvement [26].



Figure II.15 : Distributeur hydraulique [8]

3. **Contacteur :**

Contacteur (Figure II.16) est un dispositif électromécanique permettant de commuter une puissance électrique importante à distance, généralement pour commander des moteurs ou autres équipements industriels. Il est piloté par un signal de faible puissance issu de l'automate ou d'un relais[25].



Figure II.16 : Contacteur [9]

II.3.3 Les actionneurs :

Ce sont des dispositifs qui transforment une énergie (électrique, pneumatique ou hydraulique) en un mouvement mécanique, permettant d'agir physiquement sur le procédé. Ils exécutent les ordres donnés par la partie commande via les préactionneurs [26].

1. **Les vérins hydrauliques :**
   Les vérins hydrauliques (Figure II.17) sont des actionneurs linéaires qui convertissent l'énergie hydraulique en mouvement mécanique rectiligne. Ils sont utilisés lorsque des efforts importants sont nécessaires, notamment pour les mouvements de fermeture ou de serrage de la presse. Il existe deux types de vérins hydrauliques : à simple effet, pour un mouvement dans un seul sens, et à double effet, pour un mouvement dans les deux sens grâce à une pression exercée des deux côtés du piston[26].



Figure II.17 : Vérin hydrauliques [10]

2. **Les vérins pneumatiques :**
   Les vérins pneumatiques (Figure II.18) sont des actionneurs qui utilisent l'air comprimé pour produire un mouvement mécanique linéaire. Leur fonctionnement repose sur la pression de l'air agissant sur un piston dans un cylindre, provoquant le déplacement de la tige.On distingue les vérins à simple effet, pour un mouvement unidirectionnel, et les vérins à double effet, pour un mouvement bidirectionnel grâce à une pression contrôlée de chaque côté du piston[26].



Figure II.18 : Vérin pneumatique [11]

3. **Vannes proportionnelles :**

Vannes proportionnelles (Figure II.19) sont des dispositifs de régulation qui contrôlent précisément le débit ou la pression d'un fluide (air, huile) en modulant de manière continue leur ouverture [27]. Elles sont essentielles dans les applications nécessitant un contrôle dynamique et précis, comme les presses hydrauliques, les équipements de moulage ou les systèmes de dosage, où la régulation doit s'adapter en temps réel aux exigences du processus .



Figure II.19 : Vannes proportionnelles [8]

II.3.4 Station Hydraulique :

Station Hydraulique (Figure II.20) est un ensemble composé d'une pompe, d'un moteur, et de divers équipements permettant de fournir et de réguler la pression ainsi que le débit du fluide hydraulique nécessaire au fonctionnement des vérins et autres actionneurs [28].Cette station hydraulique assure l'alimentation en huile sous pression pour les mouvements de fermeture et d'ouverture du moule.



Figure II.20 : Station Hydraulique [3]

II.3.4.1 Moteur Électrique

Le moteur électrique (Figure II.21) est un dispositif électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique par l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique, générant un mouvement rotatif continu. Il se compose généralement d'un stator, d'un rotor, d'un système d'excitation et de balais [29]. Il est utilisé pour assurer la mise en mouvement des organes mobiles, tels que les pompes hydrauliques ou les convoyeurs.



Figure II.21 : Moteur de refroidissement d'huile [3]

II.3.4.2 Pompe haute pression à palette :

La pompe haute pression à palettes (Figure II.22) est une pompe volumétrique utilisant des palettes coulissantes dans un rotor excentré pour aspirer et refouler le fluide. Elle offre un débit régulier, une bonne efficacité et peut fonctionner à des pressions élevées avec peu de pulsations [28].Elle est utilisée pour alimenter les vérins hydrauliques de la presse en huile sous pression. (Figure II.12)

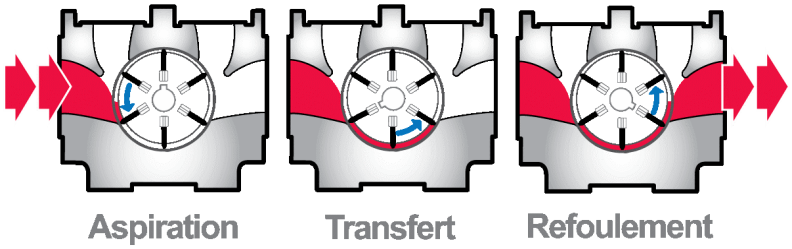


Figure II.22 : Principe de fonctionnement de la pompe à palette [12]

II.3.4.3 Pompe basse pression à engrenage :

La pompe basse pression à engrenages (Figure II.23) est une pompe volumétrique rotative constituée de deux roues dentées (engrenages) en prise directe dans un carter étanche. Leur rotation crée un vide partiel à l'aspiration, permettant d'aspirer le fluide qui est ensuite transporté entre les dents vers la sortie. Ce principe garantit un débit régulier avec peu de pulsations [28].



Figure II.23 : Pompe à engrenage [13]

II.4 La partie pupitre :

Le pupitre de commande (Figure III.25) permet à l'opérateur de piloter l'ensemble du cycle de fonctionnement de la presse. Il regroupe les différents boutons de commande, les voyants de signalisation, les sélecteurs de mode et un écran HMI. C'est à travers ce pupitre que l'opérateur lance les opérations, surveille l'état de la machine et intervient en cas de besoin (arrêt d'urgence, changement de mode, etc.).



Figure II.24 : La partie pupitre [3]

II.5 Éléments de la partie commande :

La partie commande est composée d'un automate programmable industriel (API) S7-1500 (modèle 1515-2PN), de trois stations d'E/S déportées ET200SP, ainsi que d'une interface homme-machine (IHM) TP900 Comfort. L'ensemble de ces composants assure le contrôle et la supervision du processus automatisé.

II.5.1 Automate Programmable Industriel (API) :

Un Automate Programmable Industriel (API) est un dispositif électronique destiné à automatiser les processus industriels en traitant les signaux des capteurs pour commander les actionneurs selon un programme préétabli. L'API se compose généralement d'une unité centrale (UC), de modules d'entrées/sorties (E/S), d'un bloc d'alimentation, d'un module de communication, ainsi que d'un bus interne assurant la liaison entre les composants internes, et d'un bus de terrain permettant la communication avec des périphériques déportés (figure III.26). Il est programmé à l'aide de langages normalisés, tels que le ladder ou le langage structuré, permettant une adaptation souple et fiable aux différents processus automatisés [14].
Sur le marché industriel, différentes gammes d'API sont proposées selon la complexité de l'environnement, parmi lesquelles la série SIMATIC S7 de Siemens, largement utilisée dans de nombreux secteurs. Au sein de cette gamme, c'est le modèle S7-1500 qui a été utilisé pour le développement du système automatisé de la presse et qui fera l'objet de la section suivante.

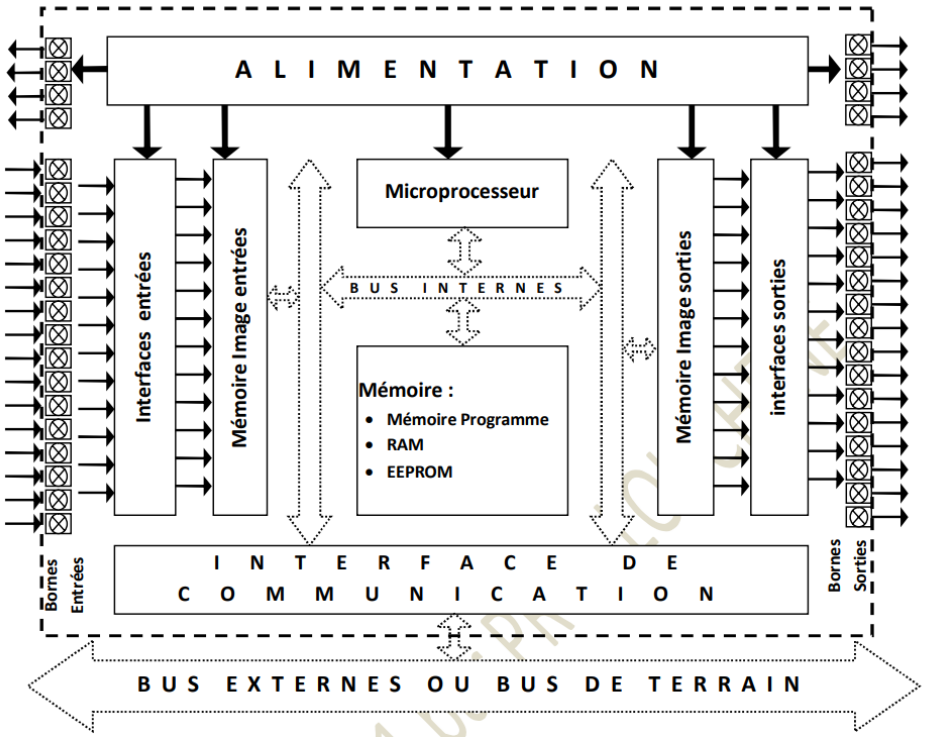


Figure II.25 : Architecture d'un API [14]

II.5.1.1 Automate programmable Siemens S7-1500 :

1. **Présentation de la gamme :**

La gamme Siemens S7-1500 est une nouvelle génération d'automates programmables, succédant au S7-300, conçue pour les systèmes d'automatisation modernes. Elle se distingue par ses performances élevées, sa grande fiabilité et une intégration simplifiée dans les architectures industrielles. Cette gamme modulaire propose plusieurs types de CPU (standard, compactes, failsafe) ainsi qu'un large choix de modules d'entrées/sorties, de communication et technologiques, adaptés à divers besoins.

Ces automates intègrent des fonctionnalités avancées telles que la connectivité Profinet/Profibus, OPC UA , le diagnostic système en temps réel, la protection des programmes, et un traitement rapide des instructions, les rendant adaptés aux applications industrielles critiques. De plus, un écran de diagnostic intégré sur chaque CPU affiche l'état du système et les messages d'erreur, facilitant ainsi les interventions de maintenance [15].

2. **Configuration matérielle du projet :**

Dans le cadre de notre projet, l'automate retenu est un Siemens S7-1500, équipé d'une CPU 1515-2 PN (référence 6ES7 515-2AM01-0AB0), sélectionnée pour ses performances avancées et sa compatibilité avec les réseaux industriels via l'interface PROFINET intégrée. L'alimentation est assurée par un module 24 VDC – 25 W. La configuration matérielle, définie dans l'environnement TIA Portal, est illustrée à la (Figure II.26)

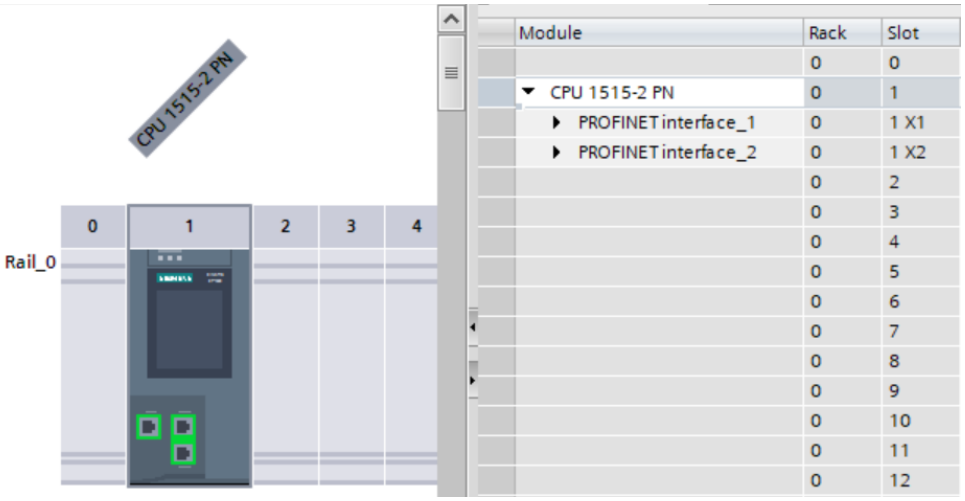


Figure II.26 : Configuration du rack de l'API

3. **Spécificités du CPU utilisé :**

Les caractéristiques essentielles du CPU utilisé dans notre projet, représenté dans la figure A.1 de la configuration matérielle [15], sont les suivantes :

- **Mémoire intégrée** : 500 Ko pour le programme et 3 Mo pour les données
- **Temps de traitement** : environ 30 ns par instruction booléenne, permettant une exécution rapide des tâches de contrôle
- **Interface de communication** : deux ports PROFINET IRT intégrés, assurant une communication industrielle rapide et fiable
- **Fonctions intégrées** : écran de diagnostic, horloge temps réel, protection du programme contre les modifications non autorisées
- **Tension d'alimentation** : 24 VDC – 25 W, fournie via un module d'alimentation dédié
- **Programmation** : compatible avec TIA Portal, supporte plusieurs langages normalisés (LAD, FBD, STL, SCL)



Figure II.27 : CPU 1515-2 PN [15]

II.5.2 Stations déportées ET200 SP :

II.5.2.1 Présentation générale :

Les stations déportées ET 200SP sont des systèmes modulaires d'entrées/sorties distribuées, conçues pour étendre les capacités d'E/S d'un automate S7-1500. Installées à proximité des capteurs et actionneurs, elles permettent de réduire le câblage. Ces stations se connectent exclusivement via le réseau industriel PROFINET IO et prennent en charge une large gamme de modules numériques, analogiques, technologiques et de sécurité [15].

La (figure II.28) illustre un exemple de l'une des stations déportées ET 200SP utilisées dans notre projet, avec ses différents modules, tandis que (figure III.30) en présente les références correspondantes.

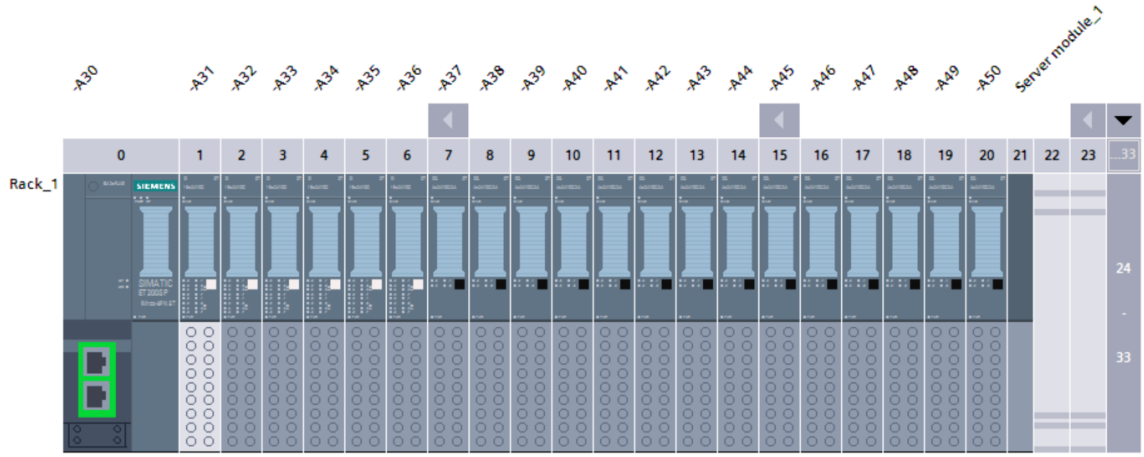


Figure II.28 : Les modules de ET200SP Vue TIA Portal

Module	...	Rack	Slot	I address	Q address	Type	Article number	Firmware
-A30		0	0			IM 155-6 PN ST	6ES7 155-6AU00-0BN0	V3.3
PROFINET interface		0	0 X1			PROFINET interface		
-A31		0	1			DI 16x24VDC ST	6ES7 131-6BH00-0BA0	V1.1
-A32		0	2			DI 16x24VDC ST	6ES7 131-6BH00-0BA0	V1.1
-A33		0	3			DI 16x24VDC ST	6ES7 131-6BH00-0BA0	V1.1
-A34		0	4			DI 16x24VDC ST	6ES7 131-6BH00-0BA0	V1.1
-A35		0	5			DI 16x24VDC ST	6ES7 131-6BH00-0BA0	V1.1
-A36		0	6			DI 16x24VDC ST	6ES7 131-6BH00-0BA0	V1.1
-A37		0	7			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A38		0	8			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A39		0	9			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A40		0	10			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A41		0	11			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A42		0	12			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A43		0	13			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A44		0	14			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A45		0	15			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A46		0	16			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A47		0	17			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A48		0	18			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A49		0	19			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1
-A50		0	20			DQ 4x24VDC/2A ST	6ES7 132-6BD20-0BA0	V1.1

Figure II.29 : Références des modules du ET200SP vue TIA PORTAL

II.5.3 HMI (Interface-Homme Machine) :

L'IHM permet la communication entre l'opérateur et le système automatisé. Afin de superviser et de piloter la presse, une interface utilisateur a été développée à l'aide du panneau HMI TP900 Comfort (référence : 6AV2 124-0JC01-0AX0), sous TIA Portal V15, comme illustré à la figure II.28.

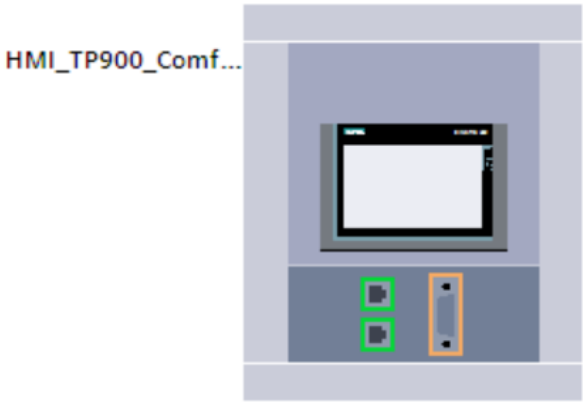


Figure II.30 : HMI TP900 Comfort vue TIA PORTAL

II.6 Logiciels utilisés dans le projet :

II.6.1 TIA Portal :

II.6.1.1 Présentation générale :

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) est une plateforme logicielle intégrée de Siemens destinée à la programmation, configuration et supervision des systèmes automatisés. Elle regroupe dans un même environnement les outils pour les automates programmables, IHM, réseaux industriels et dispositifs de sécurité. TIA Portal assure une cohérence totale entre les différents composants, facilite le développement et la maintenance, et supporte les automates SIMATIC S7 ainsi que les systèmes HMI WinCC [30].

II.6.1.2 Étapes de développement dans TIA Portal :

1. **Création d'un nouveau projet :**

La figure II.31 présente l'étape de création du projet dans TIA Portal.

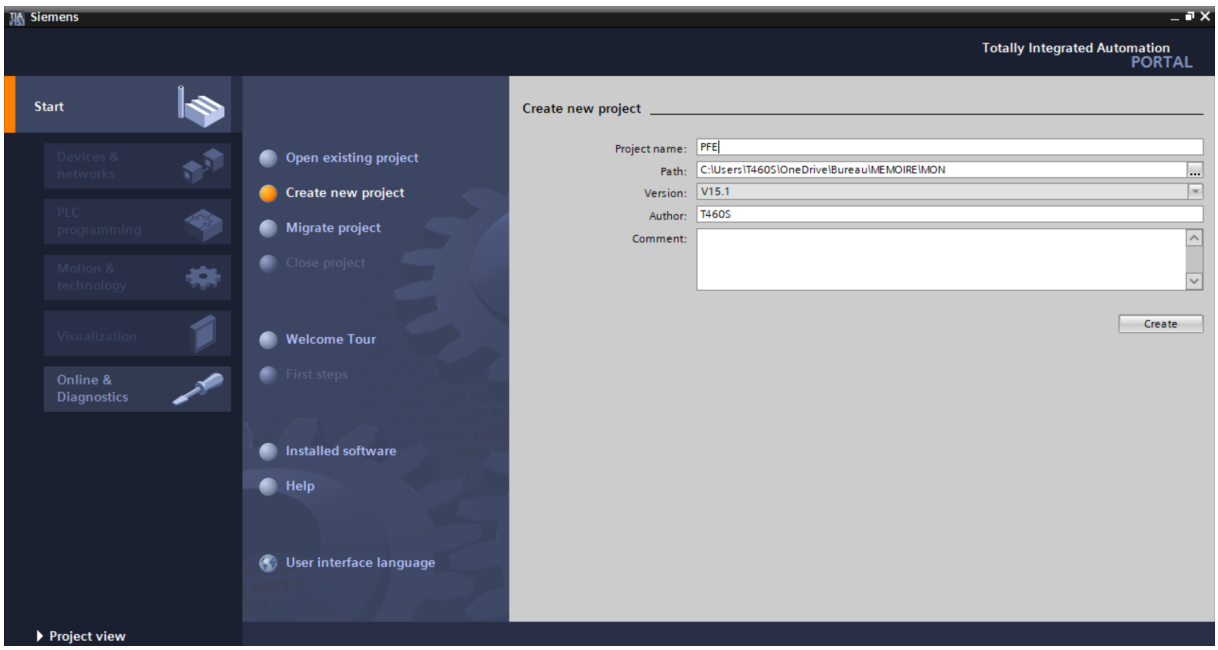


Figure II.31 : Création du projet dans TIA PORTAL vue TIA PORTAL

2. **Configuration du matériel :**
   L'utilisateur ajoute et configure les composants matériels (CPU, HMI, alimentation, etc.) à l'aide du catalogue intégré.

   - **Ajout du CPU** :
     La figure II.32 illustre l'intégration du CPU 1515-2 PN (référence 6ES7 515-2AM00-0AB0) dans le projet.

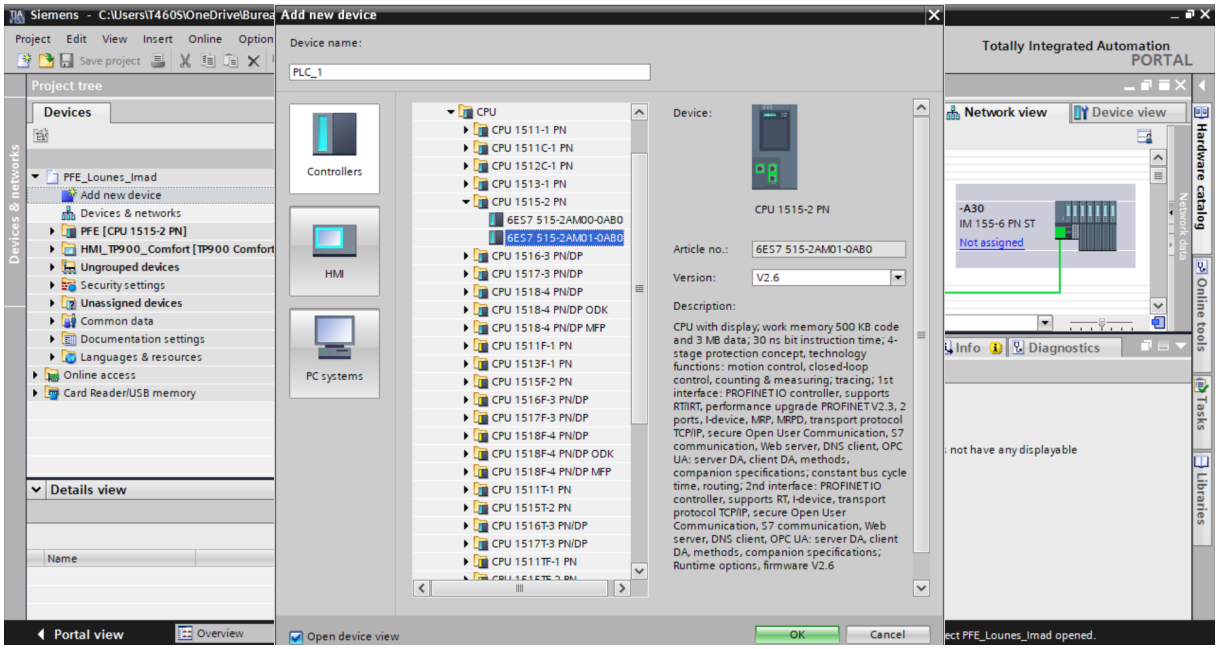


Figure II.32 : Ajout du CPU vue TIA PORTAL

- **Ajout du HMI :**

  La figure II.32 illustre l'intégration de l'interface HMI TP900 Comfort (référence 6AV2 124-0JC01-0AX0) dans le projet.

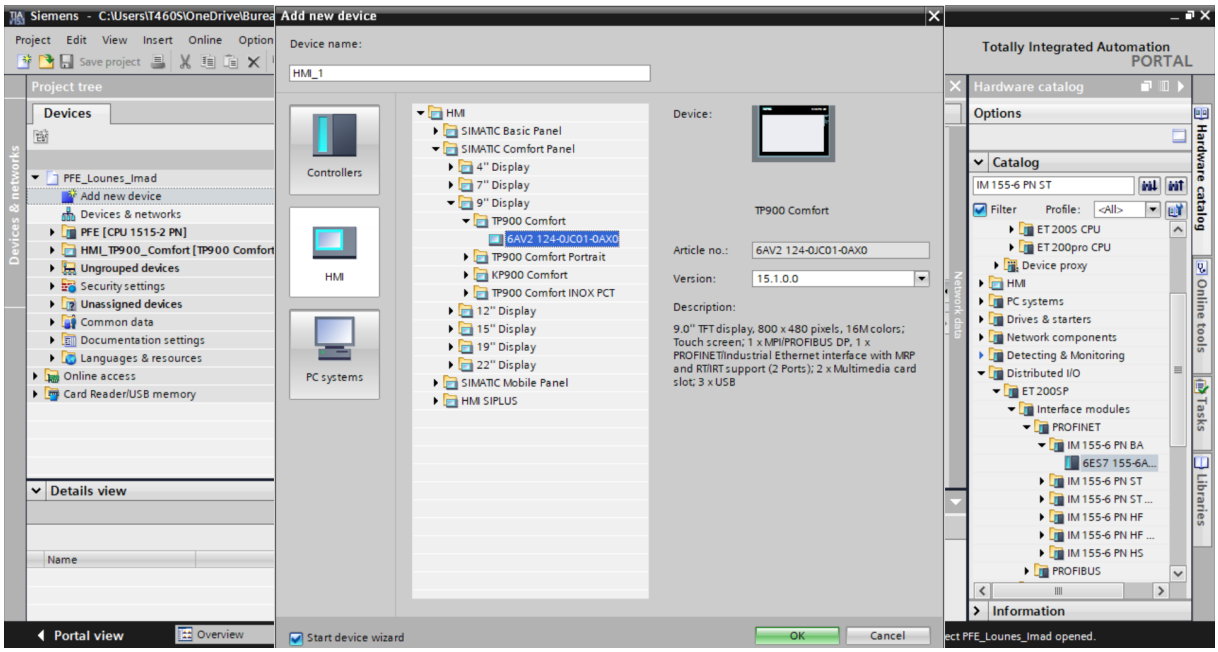


Figure II.33 : Ajout du HMI vue TIA PORTAL

- **Ajout du ET200SP IM 155-6 PN ST :**

  La figure II.34 illustre l'intégration de la station déportée ET200SP avec le module d'interface IM 155-6 PN ST dans le projet.

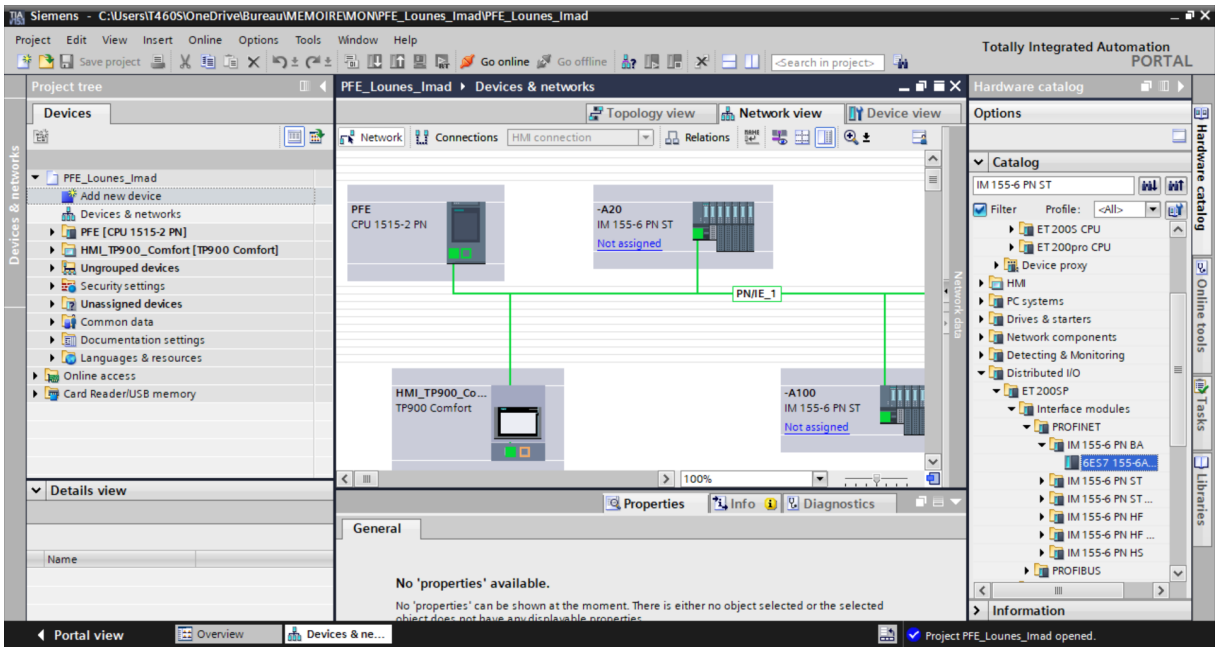


Figure II.34 : Ajout du ET200SP IM 155-6 PN ST vue TIA PORTAL

II.6.2 OPC UA :

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) est un protocole de communication standardisé, conçu pour l'échange sécurisé et structuré de données dans les systèmes industriels. Contrairement à des protocoles plus simples comme Modbus, OPC UA offre des fonctionnalités avancées telles que la sécurité intégrée, l'interopérabilité multiplateforme et une modélisation riche des données [31].

Dans le contexte de l'usine IRIS Tyres, les automates Siemens S7-1500 intègrent nativement un serveur OPC UA, permettant une communication directe avec un client Python, les systèmes SCADA, les interfaces HMI ou d'autres équipements industriels (figure II.35). Cette architecture élimine le besoin de passerelles tierces et reste compatible, quelle que soit la version du TIA Portal, assurant ainsi une intégration simple, évolutive et sécurisée dans l'environnement de production.

OPC UA repose sur une structure orientée objet, où chaque donnée de l'automate est représentée sous forme de nœud (node) dans un espace d'adressage unifié. Ainsi, les blocs de données (DB) ou les tags créés dans le programme automate sont automatiquement exposés sous forme de nœuds accessibles depuis un client OPC UA. Chaque nœud contient des métadonnées (nom, type, description, unité, etc.) et peut être lu, écrit ou surveillé en temps réel. Cette représentation hiérarchique facilite l'organisation, la navigation et l'exploitation des données dans les applications de supervision, d'analyse ou de maintenance prédictive.

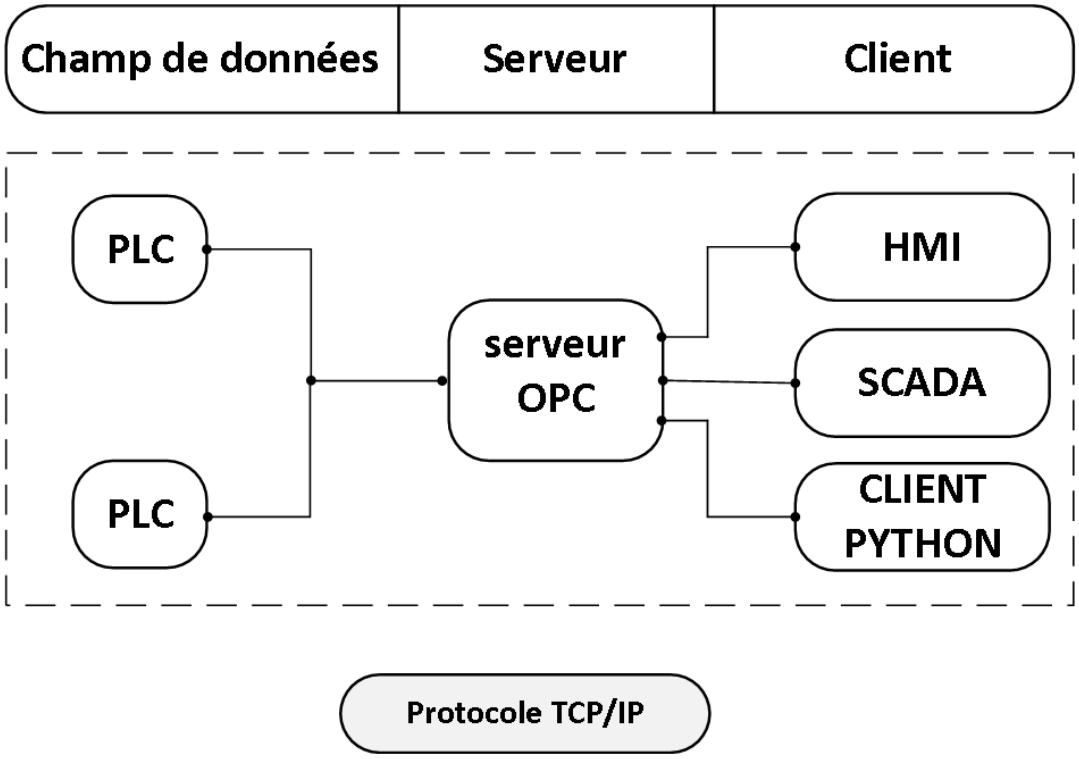


Figure II.35 : Protocole de communication OPC UA

La Figure II.36 illustre la structure d'une URL OPC UA, mettant en évidence l'adresse IP du serveur ainsi que le port TCP utilisé pour établir la communication avec le client.

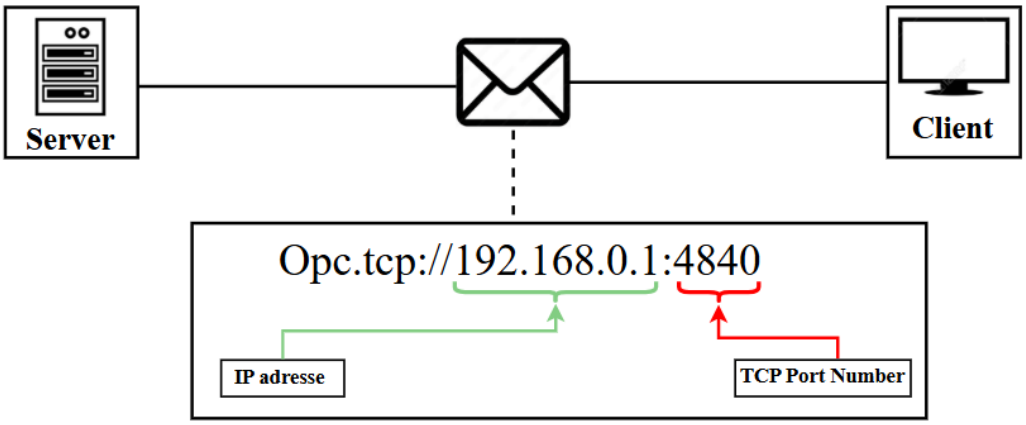


Figure II.36 : URL OPC UA

Ces fonctionnalités ont été exploitées à l'aide de UaExpert, un client OPC UA graphique développé par Unified Automation, utilisé pour tester, diagnostiquer et surveiller les échanges OPC UA dans le cadre de ce projet (voir Figure II.37).



Figure II.37 : Vue de logiciel OPC UA Expert

II.6.2.1 Rôle de UaExpert dans le projet

Dans le cadre de ce projet, UaExpert a joué un rôle central dans l'établissement et la vérification de la communication entre l'automate Siemens et le client OPC UA. Il a permis de tester la connexion avec le serveur OPC UA activé sur l'automate, notamment via l'adresse réseau du type `opc.tcp://192.168.0.1:4840`, validant ainsi l'accessibilité du serveur.

L'outil a également servi à explorer la structure interne des données exposées. Il affiche une arborescence hiérarchique des nœuds, dans laquelle sont représentés les blocs de données (DB) du programme automate. Les identifiants des variables (Node IDs),ns=3;s="DB1"."REAL_Kp", ont pu être récupérés pour leur exploitation via un script Python.

En lecture temps réel, UaExpert a permis de surveiller les valeurs critiques telles que la pression, le point de consigne, les paramètres du régulateur PID (Kp, Ki, Kd) et la réponse du système, facilitant ainsi la validation fonctionnelle.

Enfin, l'outil a été déterminant pour le diagnostic en cas de défaillance de communication. Il a permis de vérifier la disponibilité du serveur, l'exposition correcte des variables, ainsi que la compatibilité des types de données échangés, faisant de UaExpert un outil indispensable pour les tests, le contrôle et le débogage du système OPC UA mis en œuvre.

II.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail l'ensemble des composants matériels et logiciels qui composent le système automatisé mis en œuvre dans notre projet. Il a mis en lumière l'architecture de commande basée sur l'automate Siemens S7-1500, garantissant des performances élevées, une communication rapide via le protocole PROFINET et une grande flexibilité grâce aux modules déportés ET200SP. Nous avons également souligné l'apport de l'interface HMI TP900 Comfort, qui assure une interaction fluide et intuitive entre l'opérateur et le système. Sur le plan logiciel, l'environnement TIA Portal offre une plateforme centralisée pour la programmation, la configuration et la supervision du système, tandis que l'intégration du protocole OPC UA permet une interopérabilité efficace avec des applications tierces et un accès en temps réel aux données du procédé. En somme, ces technologies réunies contribuent à un pilotage performant, sécurisé et évolutif du processus de vulcanisation, répondant pleinement aux exigences d'une automatisation moderne, intelligente et orientée vers l'industrie 4.0.

Dans la continuité de cette présentation des outils matériels et logiciels, le chapitre suivant détaille leur mise en œuvre concrète à travers la programmation de la machine de vulcanisation, la configuration du réseau et l'intégration des régulations intelligentes.

Chapitre III

Développement et programmation

III.1 Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre de l'automatisation de la machine de vulcanisation à travers la plateforme TIA Portal. Il expose les éléments essentiels assurant un fonctionnement intelligent et intégré du système. La première partie est dédiée à la configuration du réseau industriel, avec l'adoption du protocole PROFINET pour une communication rapide et fiable entre les équipements. La suite présente l'organisation du programme automate ainsi que la programmation des différents sous-systèmes opératifs. La régulation des grandeurs physiques est assurée par des régulateurs PID classiques, dont les paramètres sont ajustés automatiquement grâce à l'autotuning. Par ailleurs, la mise en œuvre de la communication OPC UA entre le PLC et un client Python permet l'intégration de régulateurs PID adaptatifs flous, renforçant ainsi l'intelligence du système.

III.2 Configuration réseau et communication

III.2.1 Topologie et interconnexion des équipements

Le réseau industriel repose sur la technologie PROFINET, qui assure la communication entre le CPU S7-1500, les stations déportées ET200SP, le panneau HMI TP900 Comfort et le PC de développement. Ces équipements sont connectés à l'aide de câbles Ethernet RJ45 blindés, raccordés à un commutateur industriel assurant la distribution des signaux. La configuration est réalisée dans l'éditeur de topologie de TIA Portal, où chaque périphérique est identifié, et les liens réseau sont validés [32].La Figure III.1 illustre l'interconnexion physique du réseau.

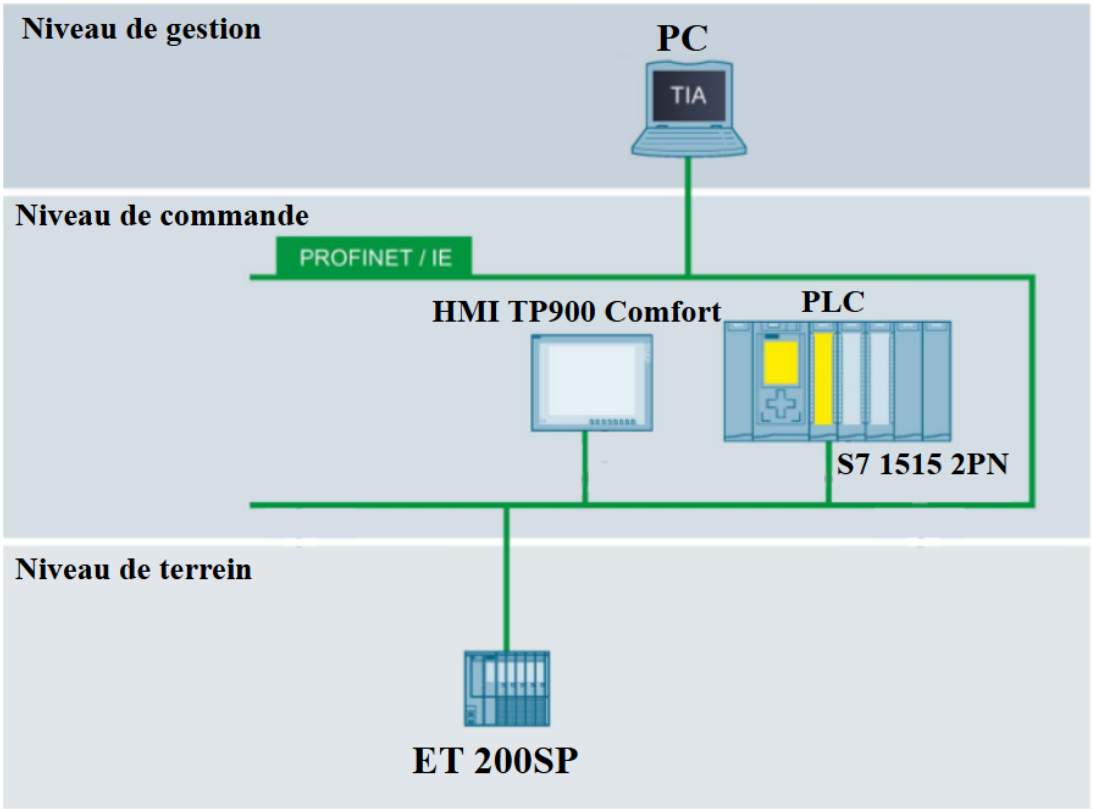


Figure III.1 : Interfaçage réseau

III.2.2 Protocole de communication : PROFINET

PROFINET (Process Field Net) est un protocole de communication Ethernet temps réel utilisé pour la transmission rapide et déterministe de données entre le CPU S7-1500, les modules déportés ET200SP, l'IHM TP900 Comfort et le poste développement. Il permet l'échange cyclique et acyclique d'informations avec des temps de cycle atteignant 1 ms [32].

Figure III.2 : Profinet (Process Field Network)

III.2.2.1 Caractéristiques principales de PROFINET

Le protocole PROFINET offre plusieurs caractéristiques techniques essentielles pour les applications industrielles [33] :

- Communication cyclique et déterministe en temps réel (RT) ainsi qu'isochrone (IRT).
- Support des topologies réseau en étoile, en ligne et en arbre.
- Compatibilité native avec les automates Siemens S7-1500 .
- Gestion efficace des périphériques via le modèle IO-Controller / IO-Device.

III.2.2.2 Architecture fonctionnelle du réseau PROFINET

Le réseau PROFINET de la presse à vulcaniser adopte une topologie en ligne, dans laquelle tous les équipements sont interconnectés via des câbles Ethernet industriels et des commutateurs non manageables. Dans cette architecture, le CPU S7-1500 joue le rôle d'IO-Controller, tandis que les ET200SP agissent en tant qu'IO-Device.La communication s'effectue de manière cyclique pour l'échange des données de process, et acyclique pour les diagnostics et les échanges non réguliers.

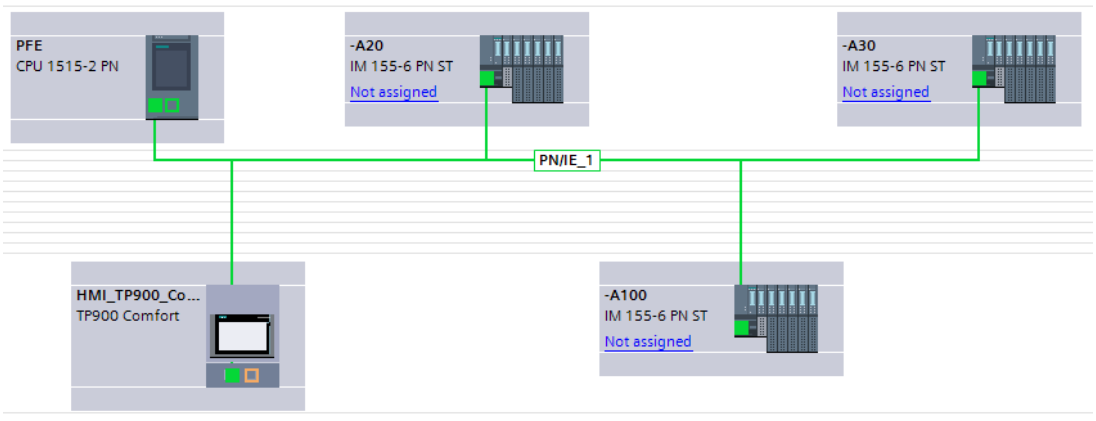


Figure III.3 : Architecture réseau mise en place

III.3 Déclaration et organisation des variables

Dans ce projet, deux types de blocs de données sont utilisés : les DB généraux, créés manuellement pour stocker des variables globales, et les DB d'instance, générés automatiquement lors de l'appel d'un FB, contenant les variables internes du bloc (IN, OUT, STAT). La figure suivante illustre un exemple de DB d'instance associé au bloc `Roller_DB` [32].

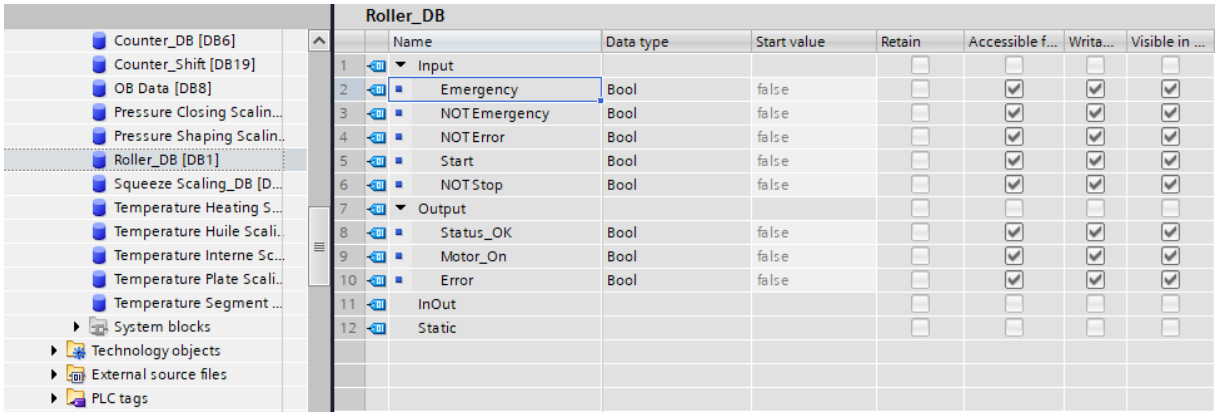


Figure III.4 : DB d'instance associé au bloc `Roller_DB`

Des tables de variables ont été créées afin de faciliter leur organisation. Au total, 113 variables sont réparties dans 10 tables. La figure suivante montre un extrait de la table des variables de type Word utilisées dans les blocs NORM et SCALE .

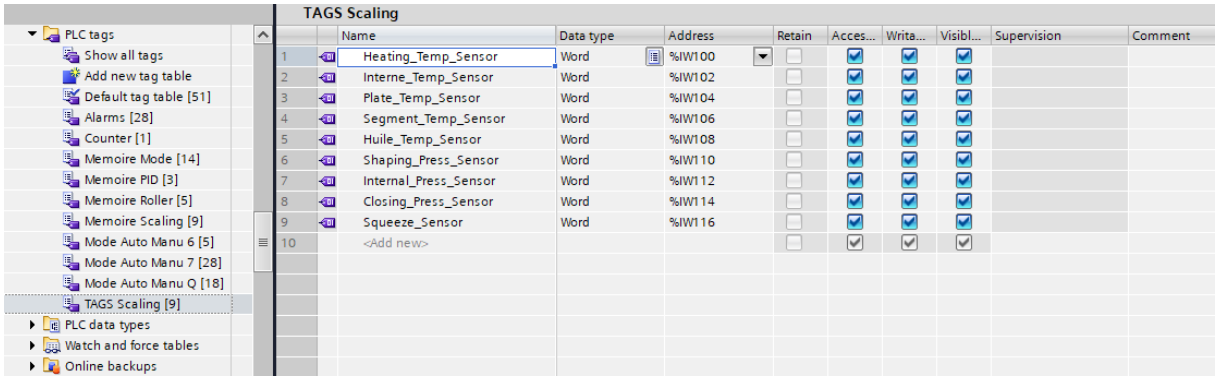


Figure III.5 : La table des variables des blocs NORM et SCALE

III.4 Structure et organisation du programme

Dans notre programme, nous avons utilisé différents blocs : OB, FC, FB et DB, chacun ayant un rôle précis. La Figure III.6 illustre ces blocs.

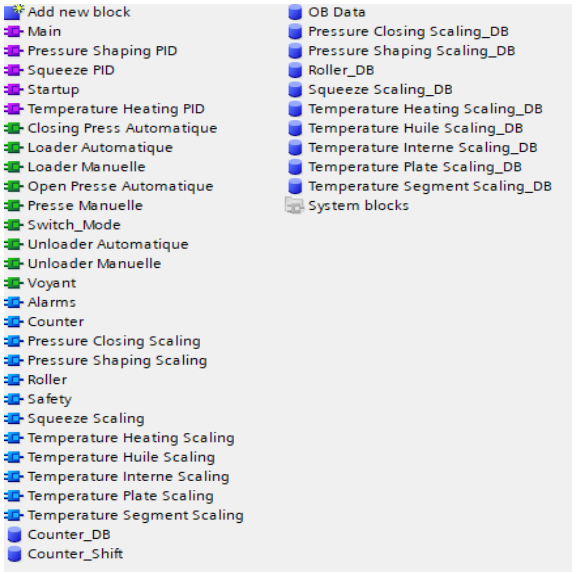


Figure III.6 : Illustration des Blocs Utilisés dans le Projet

III.4.1 Blocs d'organisation (OB)

Dans TIA Portal, les blocs d'organisation (OB) sont des points d'entrée du programme automate, chacun correspondant à un événement particulier. Ils organisent l'exécution du code et déterminent le comportement du système. Les blocs d'organisation (OB) comprennent l'OB35 pour les interruptions cycliques, ainsi que les OB82 et OB85 pour la gestion des erreurs. Dans le cadre du projet, l'utilisation a porté sur les blocs OB1, OB100 et OB30 [34].

- **OB1** : est le bloc d'organisation principal et cyclique de l'automate (Figure III.7). Il s'exécute en continu tant que le système est en marche et assure le cycle normal du programme. Tous les traitements standards et la logique de contrôle y sont programmés. Son exécution est répétitive [34].

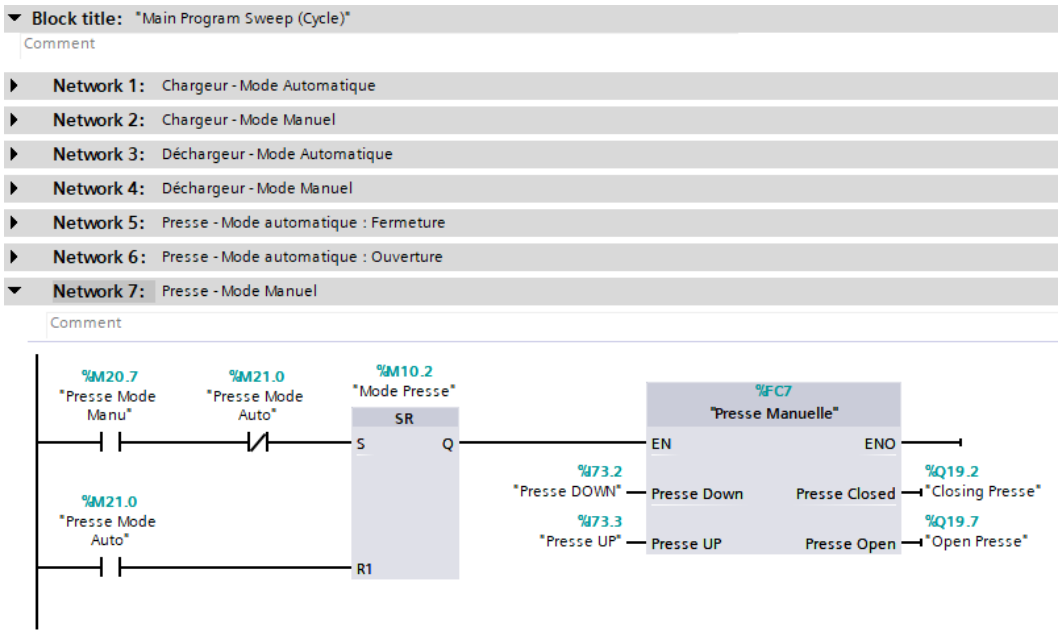


Figure III.7 : Bloc d'organisation (OB1)

- **OB Cyclique (OB30)** : est un bloc d'interruption déclenché par un événement matériel externe, tel qu'un front montant sur une entrée numérique. Ce bloc permet d'exécuter un traitement immédiat et prioritaire, interrompant temporairement le cycle principal (OB1). Il est utilisé pour gérer des événements nécessitant une réponse rapide, comme la détection d'un signal critique [34].

- **OB100** : s'exécute une seule fois au démarrage à froid de l'automate (cold start). Il sert principalement à initialiser les variables, les paramètres et les états du système avant le lancement du cycle principal, garantissant ainsi un démarrage contrôlé (Figure III.8) [34].

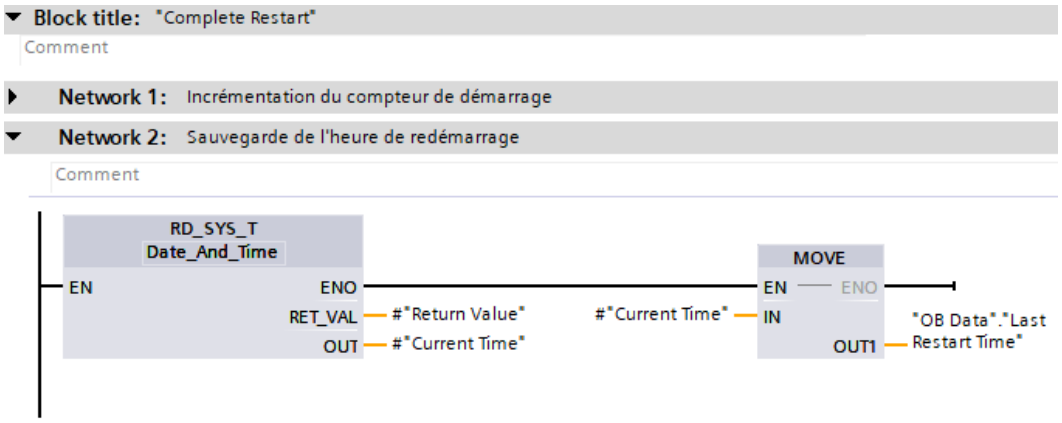


Figure III.8 : Bloc d'organisation (OB100)

III.4.2 Blocs fonctionnels (FB)

Les blocs fonctionnels (FB) dans TIA Portal sont des unités de programme réutilisables qui encapsulent une fonction ou un processus spécifique avec une mémoire locale propre, appelée instance. Chaque FB possède des interfaces d'entrées, de sorties et d'entrées/sorties, ce qui facilite leur intégration et leur réutilisation dans différents programmes ou projets [34].

III.4.3 Fonctions (FC)

Les fonctions (FC) dans TIA Portal sont des blocs de programme qui réalisent des opérations spécifiques et retournent une valeur. Contrairement aux blocs fonctionnels (FB), les FC ne conservent pas de mémoire interne entre deux appels, ce qui signifie qu'elles ne disposent pas d'instances. Elles sont généralement utilisées pour des calculs ou des traitements ne nécessitant pas de stockage d'état [34].

III.4.4 Blocs de données (DB)

Les blocs de données (DB) dans TIA Portal sont des zones de mémoire dédiées au stockage des variables du programme automate. Les DB globaux, agissant comme mémoire centrale, permettent le partage d'informations entre plusieurs blocs, tandis que les DB d'instance conservent les données spécifiques à chaque appel de bloc fonctionnel [34].

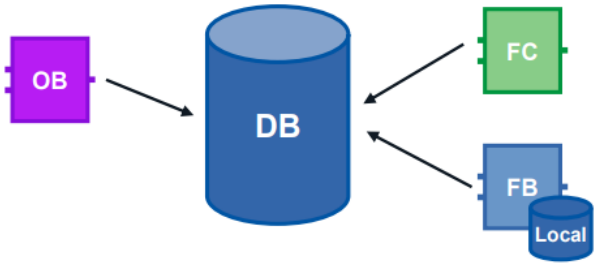


Figure III.9 : DB global comme mémoire centrale

III.5 Programmation de l'automate

III.5.1 La partie opérative

La partie opérative comprend trois ensembles : le chargeur, le déchargeur et la presse. Le chargeur insère le pneu dans la presse, le déchargeur l'en extrait, et un convoyeur transfère les pneus finis vers le convoyeur principal menant au département A. Cette phase inclut l'étape de cuisson, souvent sujette à des problèmes de pression et de température.

III.5.1.1 Partie chargeur

a) **Mode automatique**

Lorsque le mode automatique est activé via le sélecteur situé sur le pupitre de la seconde armoire, le chargeur fonctionne de manière entièrement automatisée.

La Figure III.10 illustre le bloc d'appel de la fonction correspondant à cette opération.

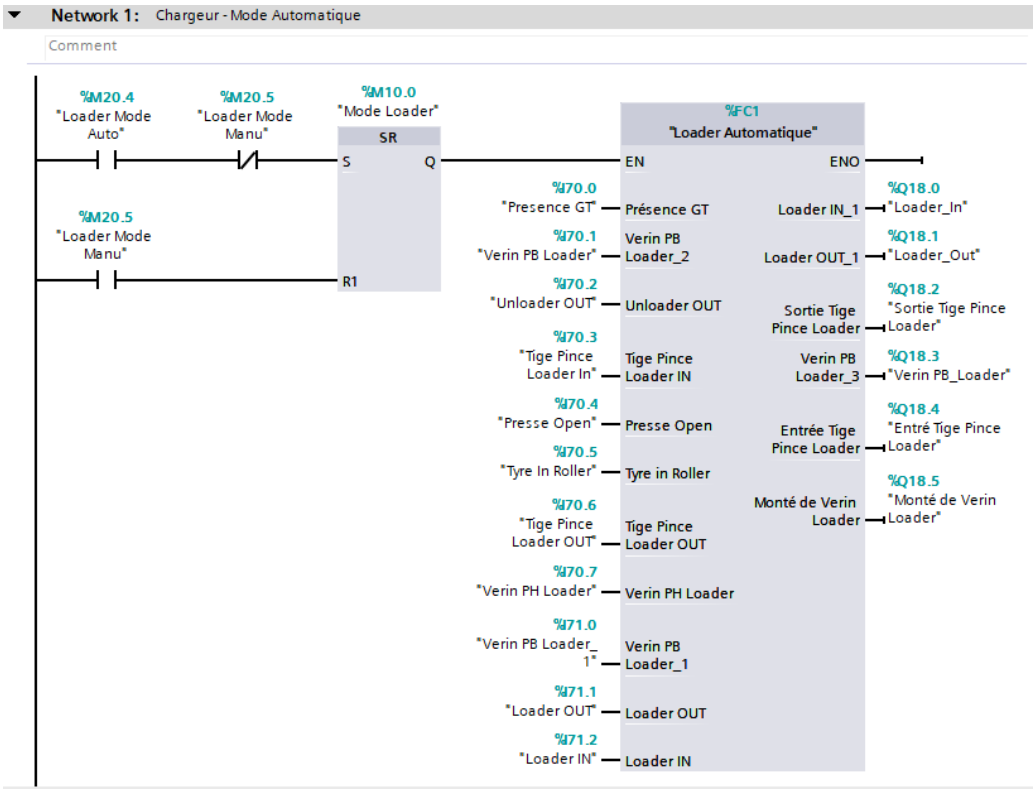


Figure III.10 : OB1 – Chargeur en mode automatique

b) **Mode manuel**

En mode manuel, l'opérateur contrôle la prise du pneu avec le sélecteur «pick/unpick», qu'il doit maintenir activé pour actionner le vérin, puis positionne le pneu dans la presse à l'aide du sélecteur «load/unload».

La Figure III.11 présente le bloc d'appel de la fonction correspondant au mode manuel du chargeur.

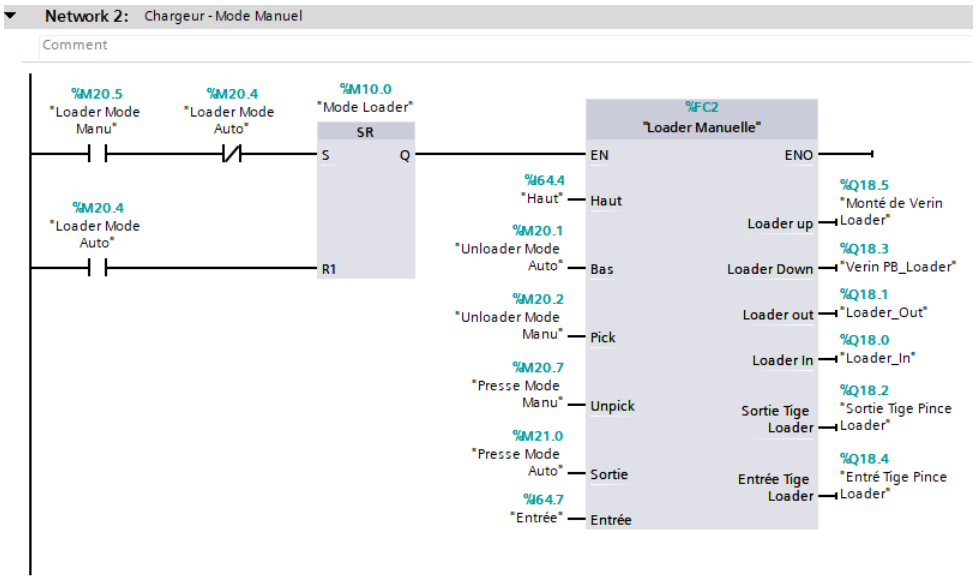


Figure III.11 : OB1 – Chargeur en mode manuel

III.5.1.2 Partie déchargeur

a) **Mode automatique**

Lorsque le mode automatique est activé via le sélecteur, le programme appelle directement la fonction qui gère le déchargeur (La Figure III.12). Le retour au mode manuel permet d'arrêter le fonctionnement automatique.

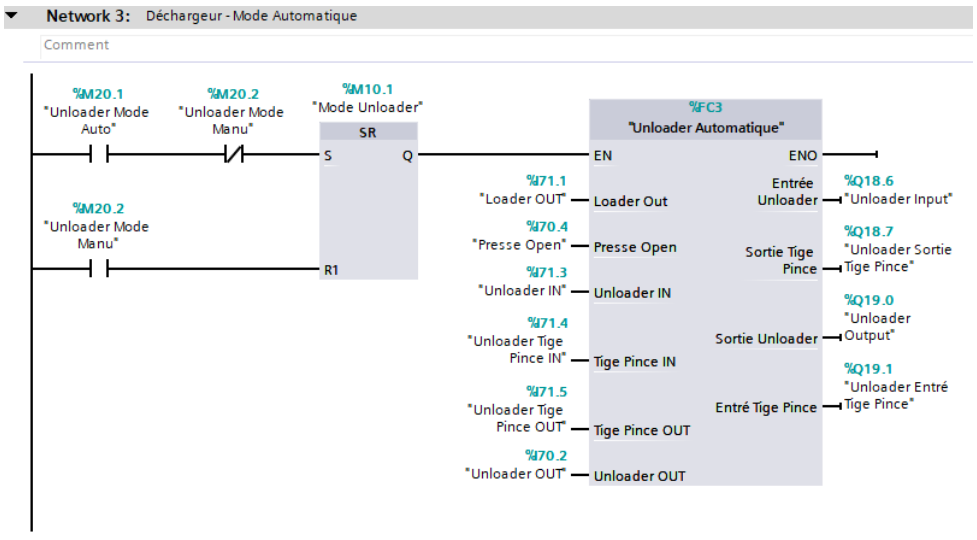


Figure III.12 : OB1 – Déchargeur en mode automatique

b) **Mode manuel**

En mode manuel, l'opérateur contrôle la prise du pneu avec le sélecteur «pick/unpick», qu'il doit maintenir activé pour actionner le vérin, puis dépose le pneu sur le convoyeur à l'aide du sélecteur «load/unload», comme illustré par le bloc d'appel de la fonction présenté dans la Figure III.13.

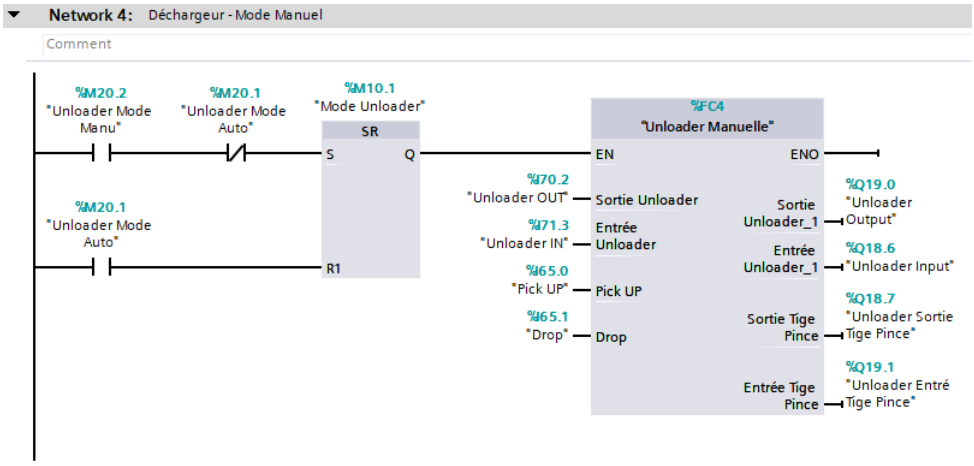


Figure III.13 : OB1 – Déchargeur en mode automatique

III.5.1.3 Partie presse

a) **Mode automatique**

En mode automatique, le programme contrôle la presse grâce aux fonctions de fermeture (Figure III.14) et d'ouverture (Figure III.15), qui assurent la gestion complète de ce mode.

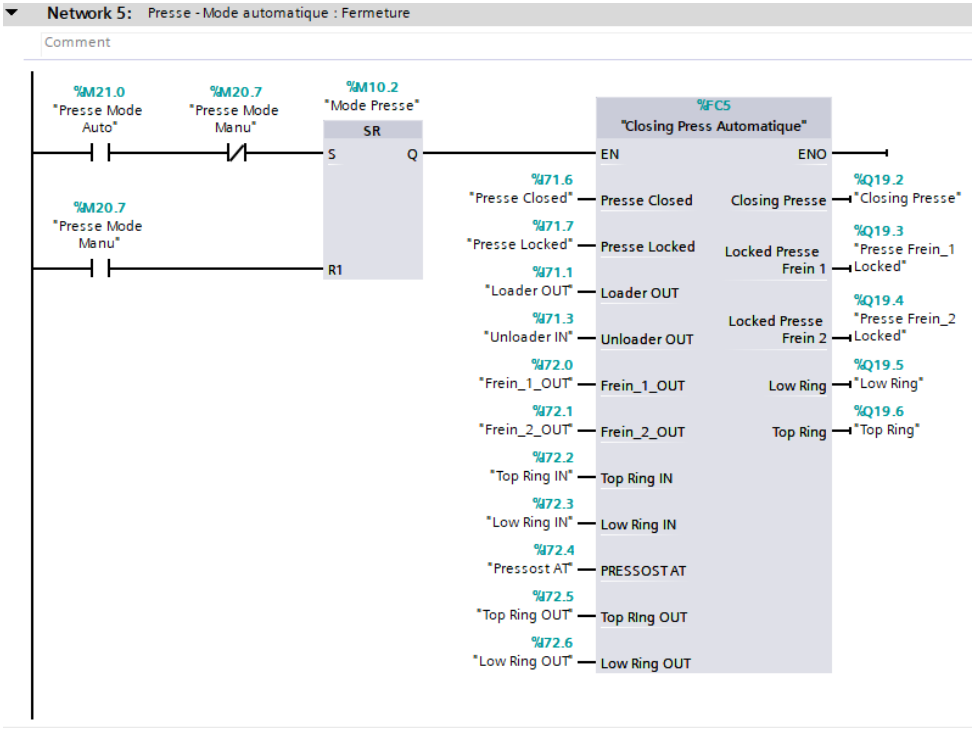


Figure III.14 : OB1 – Presse mode automatique (fermeture)

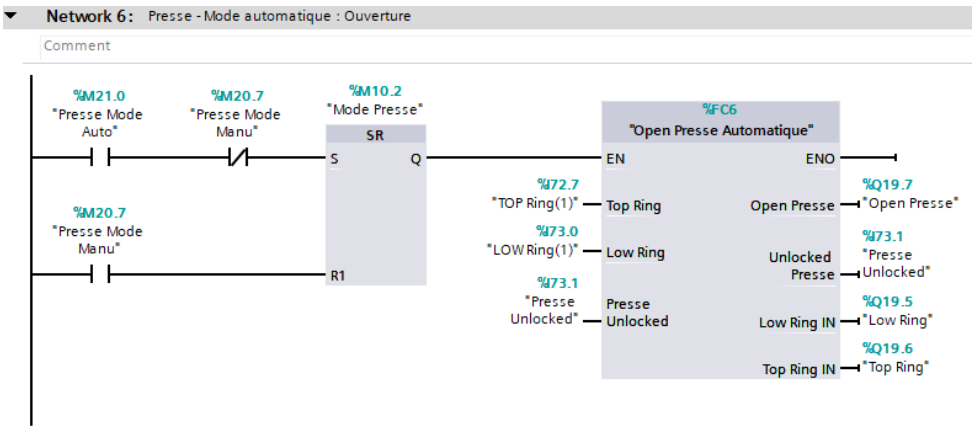


Figure III.15 : OB1 – Presse mode automatique (Ouverture)

b) **Mode manuel**

En mode manuel, l'opérateur contrôle l'ouverture et la fermeture de la presse via le sélecteur «ouverture/fermeture», qu'il doit maintenir activé pour actionner la presse. La Figure III.16 présente le bloc d'appel de la fonction correspondant à ce mode.

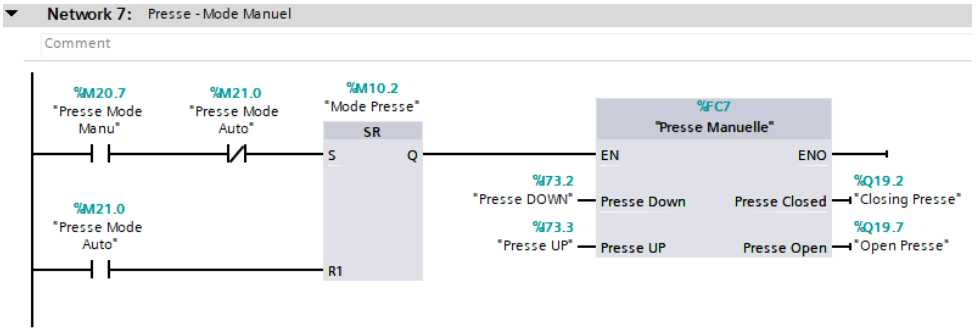


Figure III.16 : OB1 – Presse mode manuel

III.5.1.4 Partie convoyeur

Le convoyeur assure le transport des pneus finis vers le convoyeur principal. Son programme est présenté dans la Figure III.17.

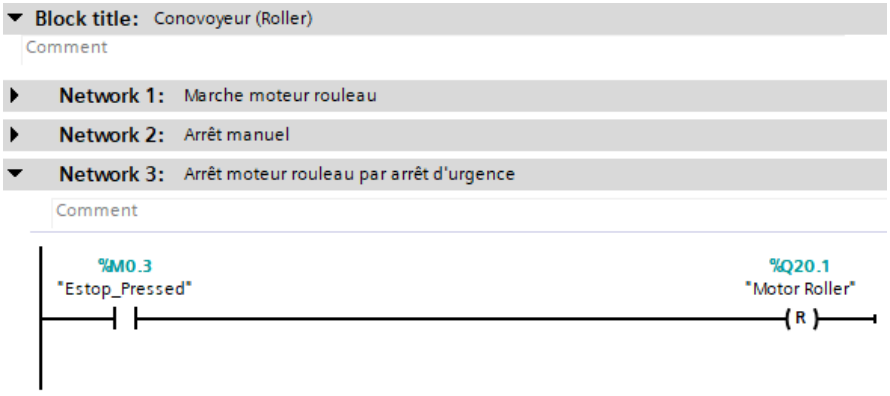


Figure III.17 : Programme de commande du Convoyeur

III.5.2 Normalisation et mise à l'échelle des signaux

Pour assurer une interprétation correcte des signaux analogiques, deux blocs standard de la bibliothèque Siemens sont utilisés : NORM_X et SCALE_X. Ces blocs permettent de convertir les valeurs mesurées en grandeurs exploitables dans le programme.

- **Bloc NORM_X :** Ce bloc effectue une normalisation de la valeur d'entrée VALUE en la ramenant sur une échelle linéaire comprise entre 0.0 et 1.0. Les bornes de cette échelle sont définies par les paramètres MIN et MAX, correspondant respectivement aux valeurs minimale et maximale attendues du signal brut. Le résultat normalisé est disponible à la sortie OUT sous forme de nombre à virgule flottante (Real)[35].

- **Bloc SCALE_X :** Ce bloc effectue l'opération inverse, c'est-à-dire une mise à l'échelle. Il prend en entrée une valeur normalisée (VALUE) sous forme flottante et la convertit en une valeur entière proportionnelle à une plage définie par les paramètres MIN et MAX. Le résultat est disponible à la sortie OUT sous forme entière (Int)[35].

- **Programmation des blocs NORM_X et SCALE_X**

  La figure III.18 illustre un exemple d'utilisation des blocs NORM_X et SCALE_X pour la mise à l'échelle de la température de chauffage, représentée par la variable «Heating_Temp_Sensor_Raw». Le bloc NORM_X permet de normaliser cette valeur brute en la mappant sur une échelle linéaire allant de 0 à 27648, définie par les paramètres MIN et MAX. Le résultat, une valeur en virgule flottante (REAL), est stocké dans la variable «Heating_Temp_Normalised». Le bloc SCALE_X convertit ensuite cette valeur normalisée en une température réelle comprise entre 0 et 100 °C, stockée dans la variable «Heating_Temp_Scaled», et directement exploitable dans le programme comme grandeur physique.

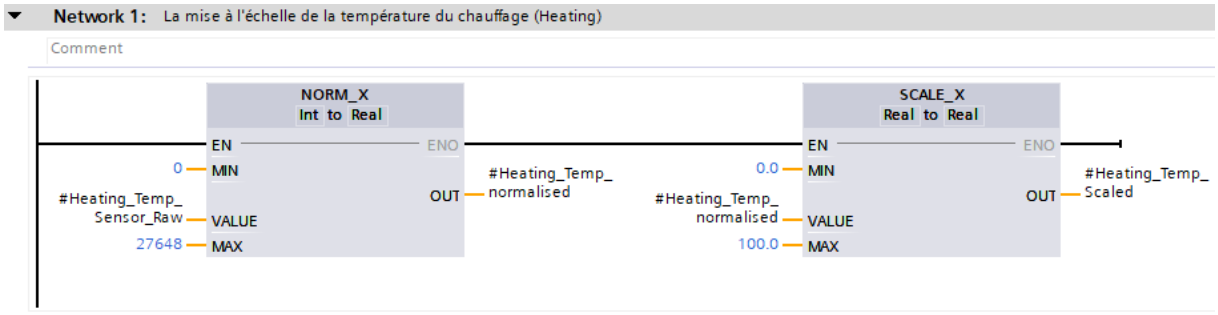


Figure III.18 : La mise à l'échelle de la température de Chauffage (Heating)

Ce traitement est réalisé dans un bloc fonctionnel (FB) dédié, qui est ensuite appelé dans l'OB1 pour assurer la conversion continue des valeurs en temps réel, comme illustré dans la Figure III.19.

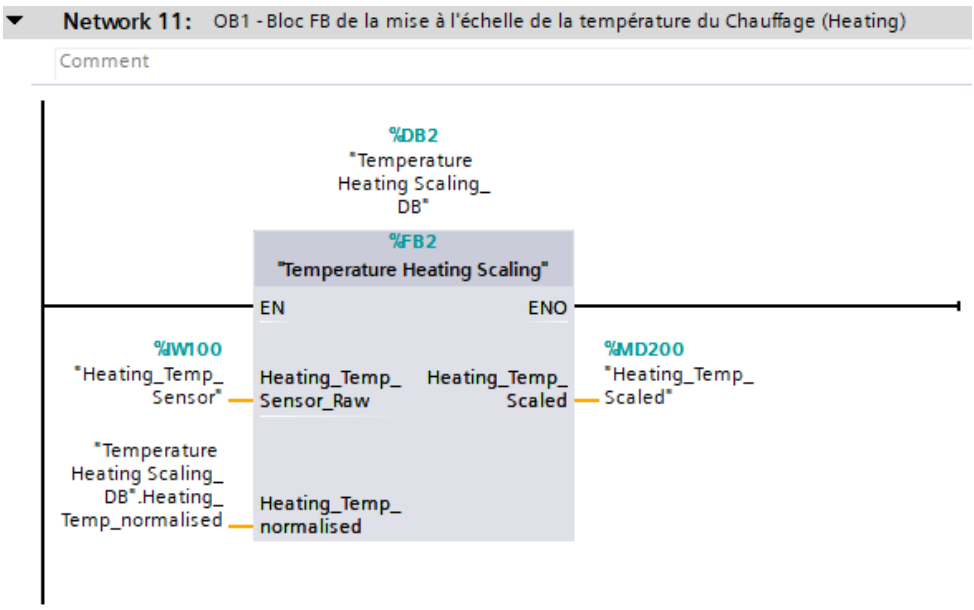


Figure III.19 : Appel du FB de mise à l'échelle de la température de Chauffage dans l'OB1

III.5.3 Régulation (PID)

Afin de réguler la température, la pression et la force, une boucle de régulation fermée a été mise en place à l'aide de régulateurs PID standards (PID_Compact) dans TIA Portal.

III.5.3.1 Présentation du bloc PID standard (PID_Compact)

Le bloc PID_Compact est un composant standard Siemens dédié à la régulation continue, compatible avec les automates S7-1500 et S7-1200. Il permet de contrôler des grandeurs telles que la température, la pression ou le débit, et s'exécute généralement dans un bloc d'organisation cyclique.

Il calcule l'écart entre la valeur mesurée (PV) issue d'un bloc de mise à l'échelle et la consigne (SP), puis applique les actions proportionnelle (P), intégrale (I) et dérivée (D) pour générer une sortie continue (CV) vers un actionneur (chauffage, vanne, etc.), en fonction de paramètres tels que K_p, K_i, K_d, le temps d'échantillonnage et les limites de sortie.

Le bloc intègre plusieurs fonctionnalités utiles, notamment le passage entre mode manuel et automatique, la limitation dynamique de la sortie, ainsi que l'auto-tuning, qui permet l'ajustement automatique des paramètres PID [36].

La Figure III.20 illustre un exemple du bloc PID_Compact pour la régulation de la pression de formage « Shaping » .

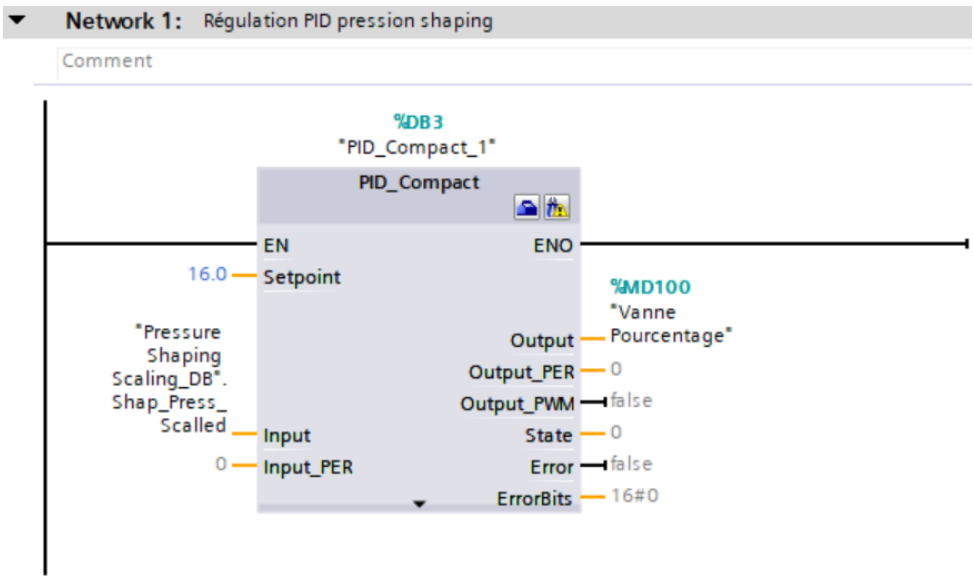


Figure III.20 : Régulation PID pression shaping

III.5.3.2 PID Tuning

La synthèse ou l'ajustement du régulateur PID (PID Tuning) consiste à déterminer les coefficients optimaux proportionnel (K_p), intégral (K_i) et dérivé (K_d) afin d'obtenir une réponse stable, rapide et avec un dépassement minimal. Plusieurs méthodes de réglage existent, classées selon qu'elles nécessitent ou non un modèle mathématique préalable du système [37].

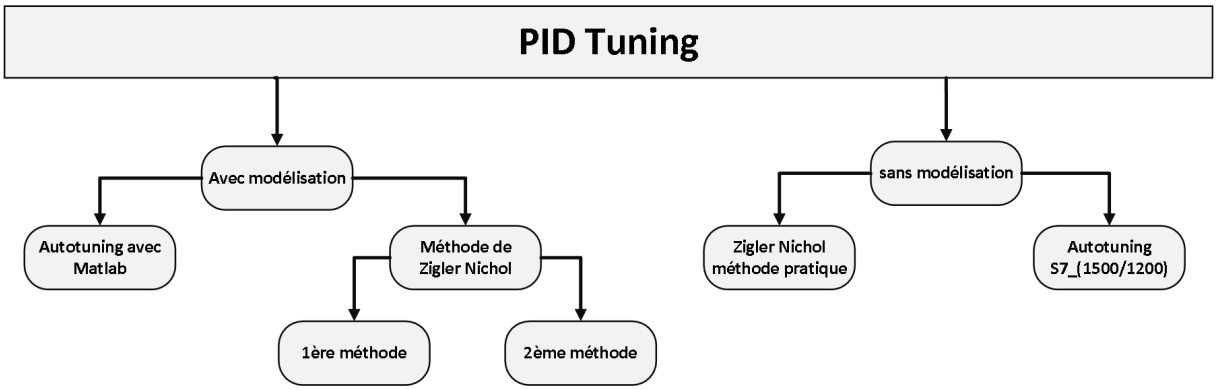


Figure III.21 : Classification des Méthodes de Réglage PID

Dans le cadre de notre application, nous avons retenu une régulation de type PI, sans utiliser l'action dérivée. Pour déterminer les paramètres optimaux K_p et K_i, nous avons choisi la méthode d'auto-tuning intégrée dans TIA Portal. Ce choix s'explique par la nature des procédés industriels, souvent complexes, partiellement connus, voire dépourvus de modèle mathématique exploitable.

III.5.3.3 Autotuning PID dans le S7-1500 : principe et fonctionnement

L'autotuning du régulateur PID dans le S7-1500 permet d'ajuster automatiquement les paramètres sans modèle mathématique préalable. Le contrôleur applique une variation de consigne (type échelon) et observe la réponse du système en temps réel (temps de réponse, dépassement,

oscillations, etc.). À partir de ces données, il calcule les coefficients Kp, Ki et Kd selon des algorithmes internes dérivés de méthodes classiques adaptées par Siemens. Une phase d'optimisation peut ensuite affiner les réglages, notamment pour les procédés sensibles (température, etc.). Le régulateur applique alors les nouveaux paramètres, surveille la stabilité du système, et réalise si nécessaire un ajustement complémentaire [36].

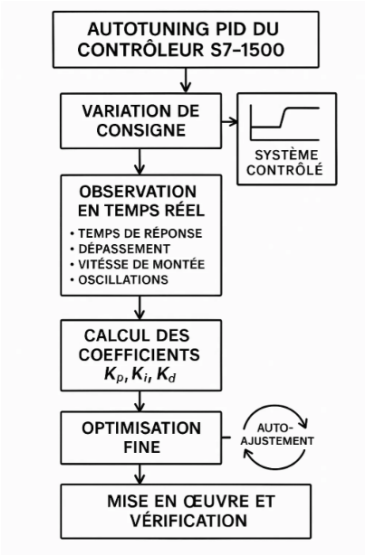


Figure III.22 : Processus d'Autotuning PID

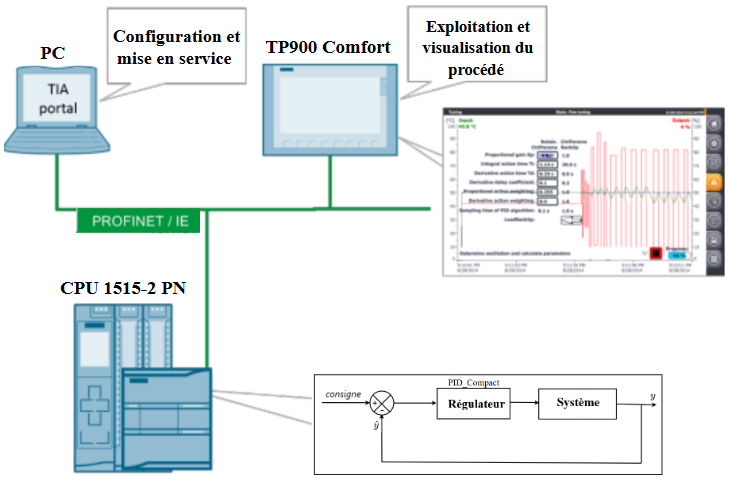


Figure III.23 : Architecture du Système de Régulation PID avec Auto-Tuning

1. **Régulation PID Pression de formage (Shaping) :**

La Figure III.24 illustre la boucle de régulation de la pression de formage (Shaping) implémentée dans le système.

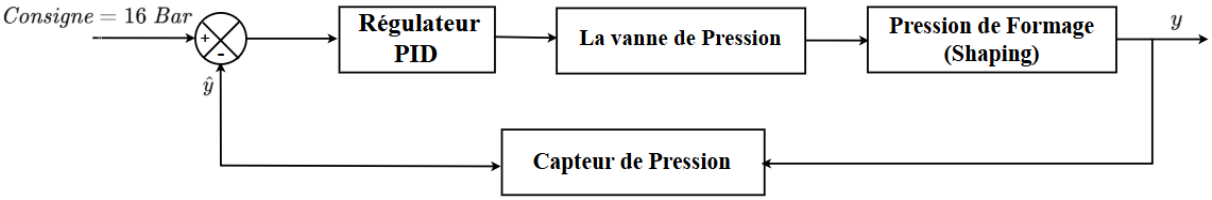


Figure III.24 : Boucle de régulation (PID)

La figure III.25 représente le bloc (OB30) de régulation PID pour la pression shaping.

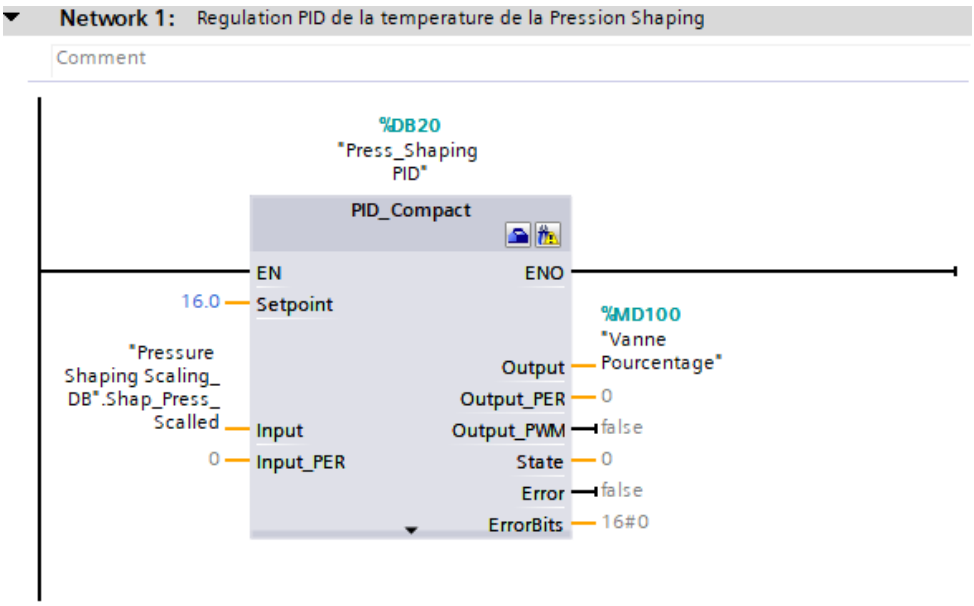


Figure III.25 : OB30 le bloc de régulation PID pression shaping

Nous avons choisi une commande de type `PI` et utilisé la méthode d'optimisation fine (*fine tuning*) pour déterminer automatiquement les paramètres `P` et `I`. Cette méthode permet à l'automate de calculer lui-même les valeurs optimales du correcteur. Les Figures III.26 et III.27 illustrent le paramétrage du bloc PID_Compact.

Dans la Figure III.26, nous avons sélectionné la régulation de la pression de *Shaping*, avec l'unité de mesure définie en bars.

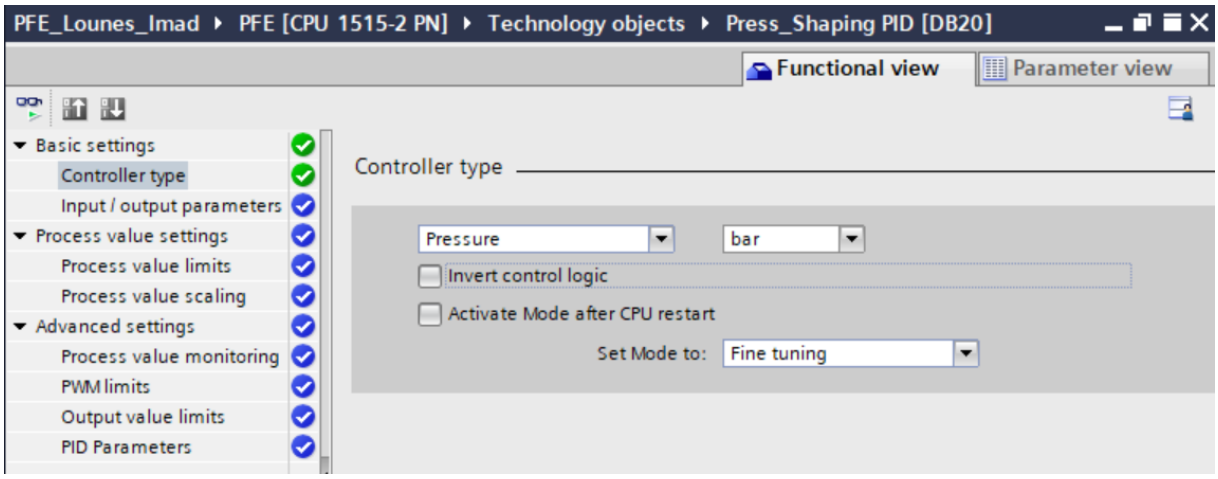


Figure III.26 : Type de régulation

Dans cette étape (Figure III.27), nous avons choisi un régulateur `PI` dont les paramètres ont été calculés automatiquement par le `PLC`.

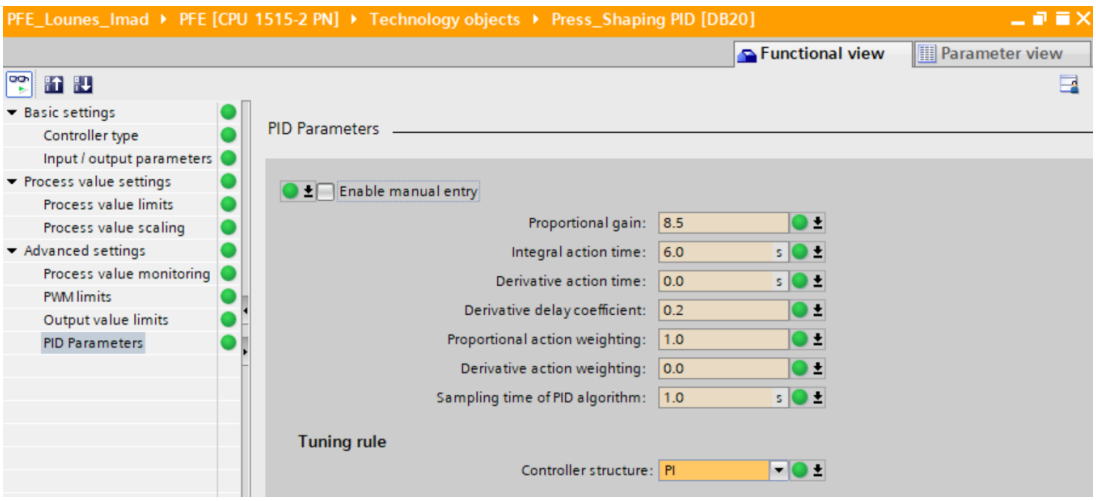


Figure III.27 : Choix de régulateur.

Remarque :

$$T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

où : T_i est le temps d'action intégrale (integral action time), K_p est le gain proportionnel, et K_i est le gain intégral.

2. **Régulation PID température de Cuisson (Heating) :**

La figure III.28 présente le bloc OB31 utilisé pour la régulation PID de la température de chauffage.

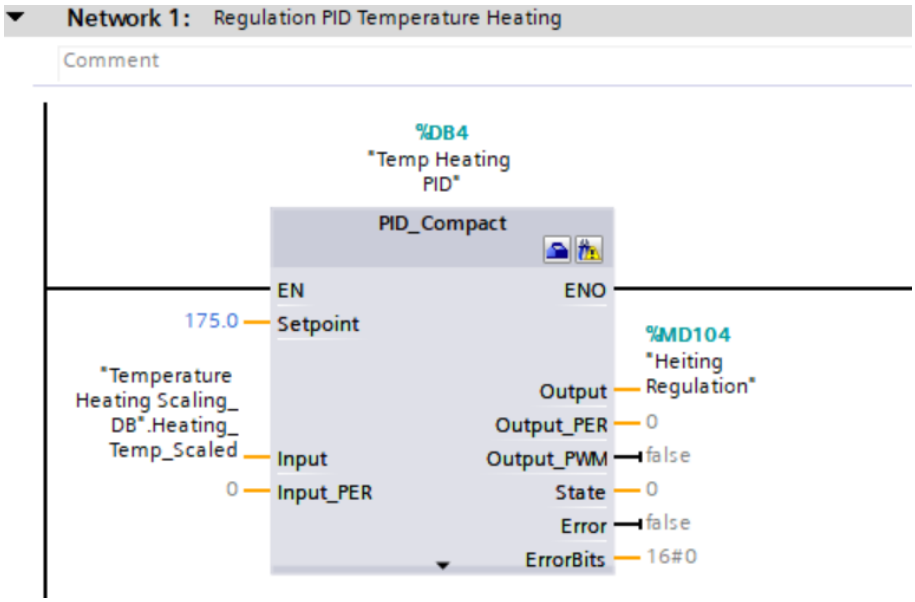


Figure III.28 : OB31 bloc de régulation PID Heating.

La Figure III.29 présente le choix du type de régulation, ici la température, avec l'unité en °C.

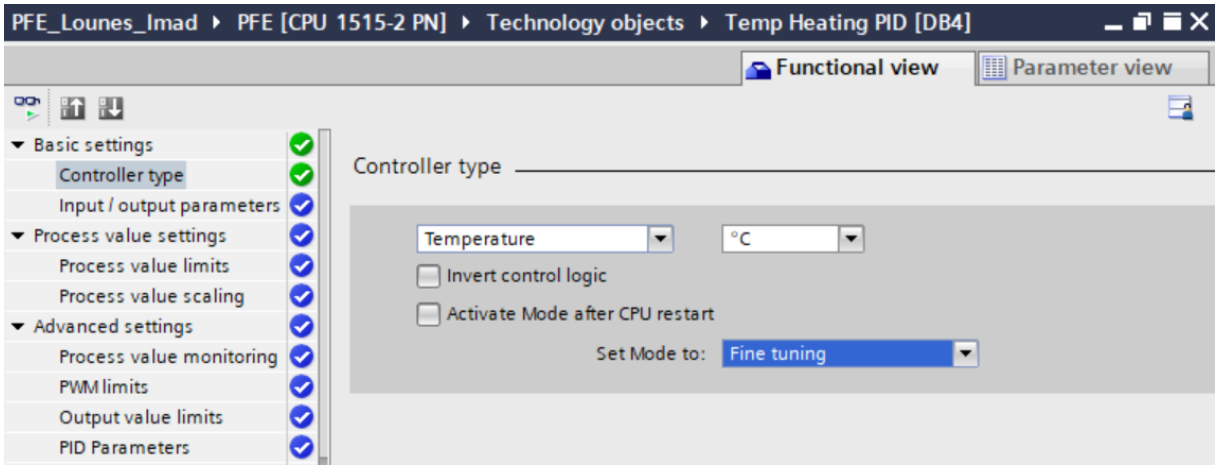


Figure III.29 : Type de régulation

La Figure III.30 illustre les paramètres `P` et `I` ainsi que le choix du régulateur.

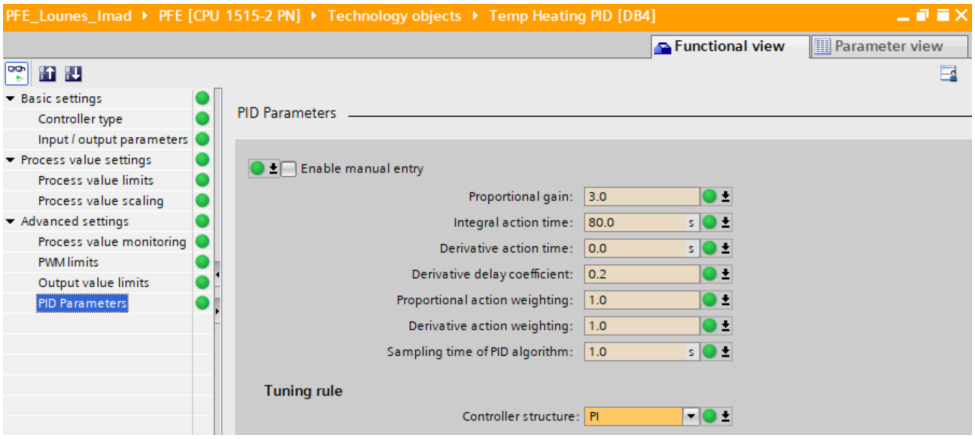


Figure III.30 : Choix de régulateur

3. **Régulation PID de la force de serrage (Squeeze)**

La Figure III.31 représente la boucle de régulation de la force de serrage (squeeze) utilisée durant la phase de fermeture du moule.

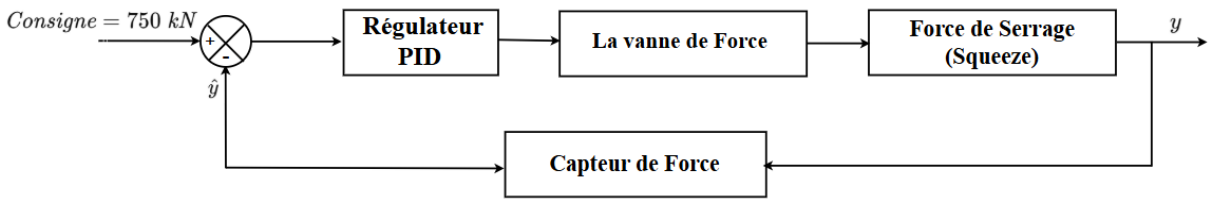


Figure III.31 : Boucle de régulation (PID) de la force de serrage (Squeeze)

La figure III.32 illustre le bloc OB32 dédié à la régulation PID de la force de serrage.

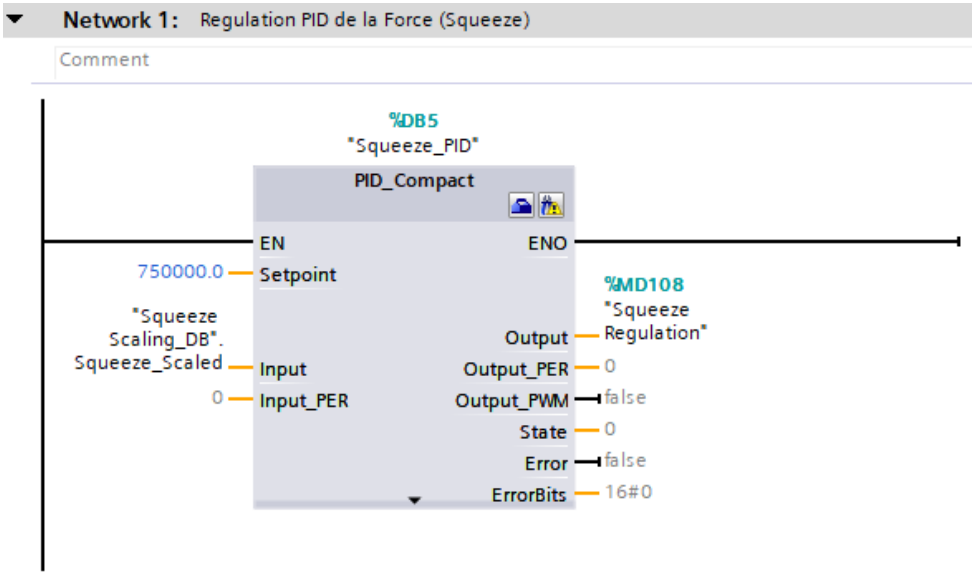


Figure III.32 : OB32 bloc de régulation PID Squeeze

La Figure III.33 présente le choix du type de régulation,ici la force, avec l'unité en Newton

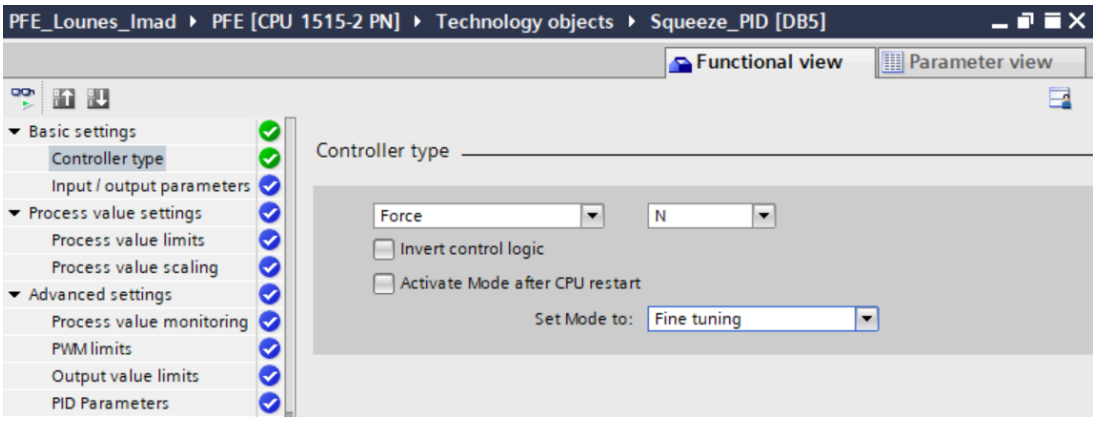


Figure III.33 : Type de régulation

La Figure III.34 montre les paramètres `P` et `I` ainsi que le choix du régulateur.

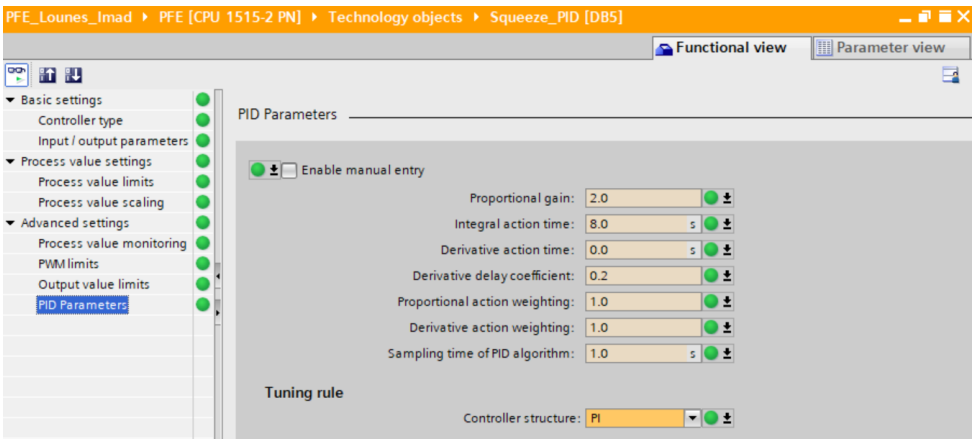


Figure III.34 : Choix de régulateur.

III.5.4 Optimisation d'un régulateur PID par une stratégie adaptative floue

III.5.4.1 Principe de la régulation PID adaptative floue

Dans certains systèmes dynamiques complexes où les conditions de fonctionnement varient rapidement, une méthode de régulation plus souple que les approches PID classiques est requise. L'approche retenue repose sur un ajustement en temps réel des gains PID (Kp, Ki, Kd) à l'aide d'un contrôleur flou adaptatif. Ce dernier analyse en continu l'erreur instantanée et sa variation (Δerreur) pour calculer, à partir d'un ensemble de règles floues, les ajustements les plus pertinents à appliquer aux paramètres du régulateur (figure III.35). Cette logique permet de s'adapter dynamiquement aux évolutions du système, en assurant une régulation plus stable, plus précise et mieux tolérante aux perturbations [38].

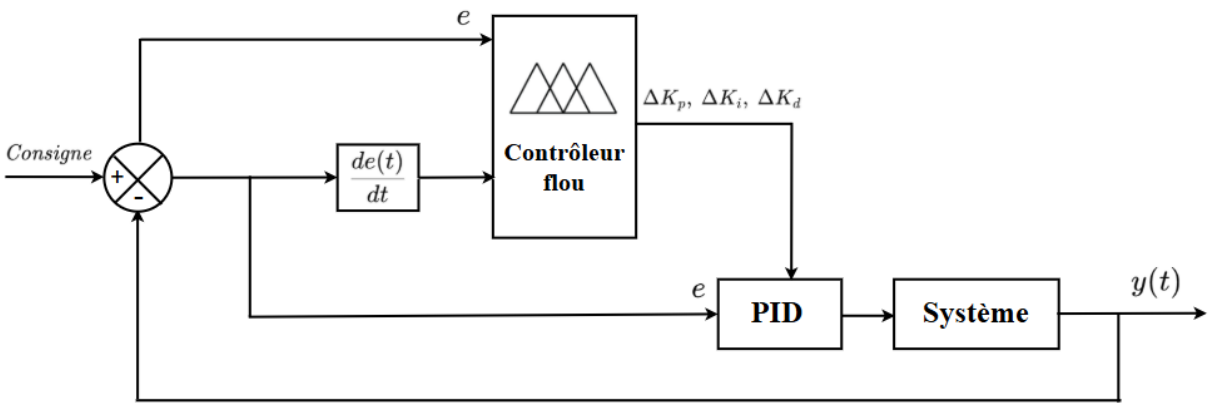


Figure III.35 : Principe d'adaptation du régulateur par la logique floue

Dans ce cadre, une architecture intelligente (figure III.36), en phase avec les exigences de l'Industrie 4.0, a été mise en place afin d'assurer une régulation adaptative continue de la pression de formage (Shaping) dans la presse de vulcanisation. Un automate Siemens S7-1500 assure le contrôle local du processus et communique avec un serveur OPC UA chargé de centraliser les variables du système. Un client Python, conçu comme contrôleur flou, y est connecté pour assurer le recalcul adaptatif des paramètres PID. Les valeurs corrigées sont ensuite renvoyées

vers l'automate, permettant une adaptation rapide aux évolutions du procédé, sans modifier l'infrastructure d'automatisation existante.
Ainsi, les gains proportionnel et intégral du régulateur PID sont ajustés en temps réel en ajoutant une variation calculée par le contrôleur flou aux valeurs nominales initiales, selon les expressions suivantes :

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \end{cases} \tag{III.1}$$

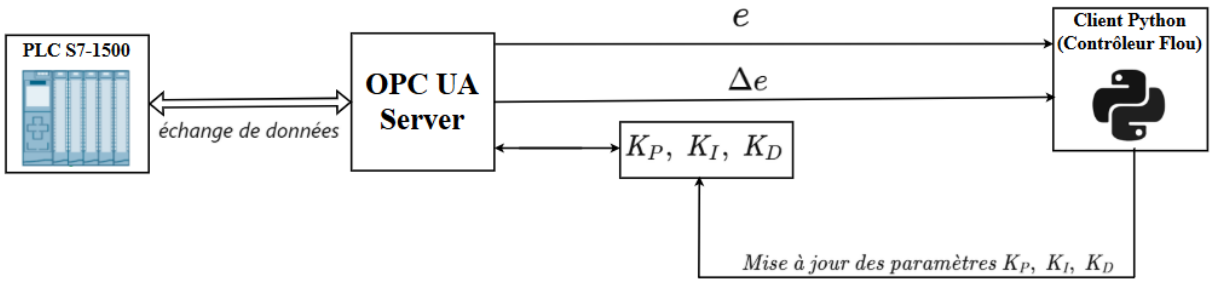


Figure III.36 : Architecture d'une régulation PID adaptative basée sur un contrôleur flou

III.5.4.2 Théorie des Contrôleurs Flous

Introduite par Lotfi Zadeh en 1965, la logique floue est une approche puissante pour modéliser des systèmes complexes ou incertains, en s'inspirant du raisonnement humain [39]. Contrairement à la logique binaire traditionnelle, qui ne considère que deux états (vrai ou faux), la logique floue permet des degrés d'appartenance variant continûment entre 0 et 1. Cela offre une représentation plus flexible et naturelle des phénomènes non linéaires ou difficilement modélisables avec des méthodes classiques [40].Cette capacité rend la logique floue particulièrement adaptée aux environnements industriels, où les comportements dynamiques peuvent être instables et les modèles analytiques rigides insuffisants.

Un contrôleur flou se compose essentiellement de quatre étapes clés (figure III.38) :

- **Fuzzification** : Cette étape consiste à transformer les variables d'entrée numériques, telles que l'erreur instantanée et sa variation, en variables linguistiques floues à l'aide de fonctions d'appartenance, illustrées ci-dessous (figure III.37).

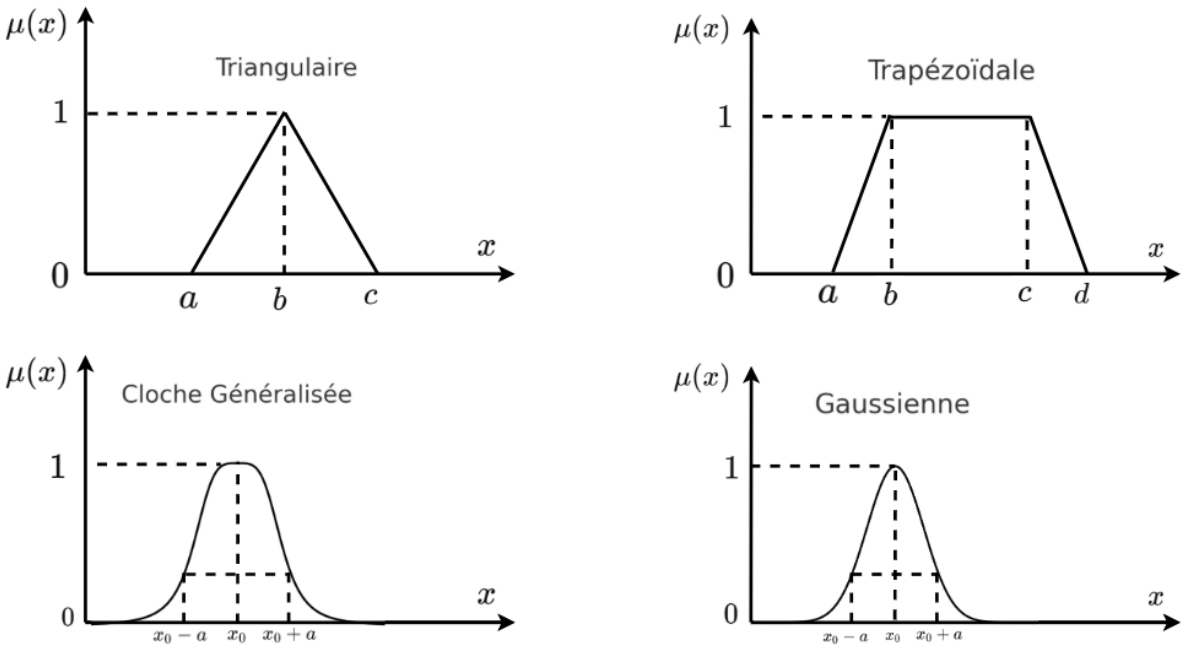


Figure III.37 : Exemple de différentes formes des fonctions d'appartenance.

- **Base de connaissances** : Elle regroupe un ensemble de règles linguistiques formulées sous la forme de propositions du type « SI... ALORS ». Par exemple : SI l'erreur est positive ET la variation d'erreur est négative, ALORS augmenter légèrement K_p. Ces règles encodent l'expertise humaine et définissent comment le contrôleur doit réagir dans diverses situations.
- **Moteur d'inférences** : Ce module applique les règles de la base de connaissances aux entrées floues reçues, afin de déterminer une sortie floue qui représente la commande à appliquer.
- **Défuzzification** : Enfin, la sortie floue obtenue est convertie en une valeur numérique précise, généralement par la méthode du centre de gravité, afin d'être utilisée dans le système de commande [40].

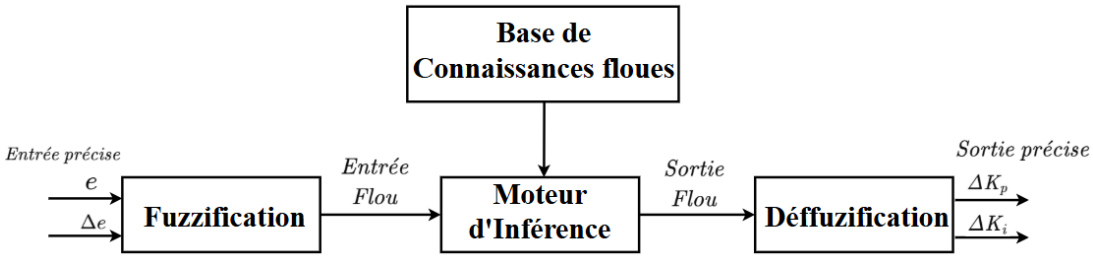


Figure III.38 : Schéma générale d'une commande floue

III.5.4.3 Structure du contrôleur flou dans le contexte PID

La structure d'un contrôleur flou destiné à une régulation PID adaptative repose sur une approche incrémentale. Au lieu de calculer directement la commande de régulation, le contrôleur

flou détermine l'incrément à appliquer aux gains PID, ce qui limite les variations brusques et améliore la stabilité globale du système [41]. Le système complet peut être vu comme une boucle de régulation adaptative, dans laquelle le contrôleur flou joue le rôle d'un ajusteur intelligent des paramètres K_p, K_i et K_d. Ce recalcul s'effectue périodiquement, toutes les 100 ms, pour suivre l'évolution rapide du processus industriel.
Ce mécanisme s'appuie sur plusieurs étapes essentielles, qui transforment les informations d'entrée en ajustements précis des paramètres du régulateur :

1. **Entrées du contrôleur (Input)**

   Dans le cadre de ce projet, la régulation s'appuie sur la mesure en temps réel de l'erreur entre la consigne et la valeur réelle du procédé. Cette mesure est réalisée via un automate programmable industriel (PLC) Siemens S7-1500, qui échange des données avec les capteurs à travers le protocole OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture). Les données du procédé (Kp, Ti, consigne, pression de formage (shaping), données des capteurs, etc.) sont transmises par le PLC à un serveur OPC UA. Un programme externe développé en Python se connecte à ce serveur pour récupérer ces données en temps réel et effectuer les calculs nécessaires à la commande. Le contrôleur flou reçoit alors deux entrées principales à chaque cycle d'échantillonnage, ici fixé à 100 ms :

   - **Erreur instantanée :**
     L'erreur instantanée est définie comme :

     $$e(k) = e^*(k) - e(k)$$

     où : $e^*(k)$ est la consigne et $e(k)$ la mesure réelle à l'instant k ; l'erreur indique l'écart entre la valeur souhaitée et observée.
   - **Variation de l'erreur :**
     La variation de l'erreur est donnée par :

     $$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_e}$$

     où : T_e est l'intervalle d'échantillonnage (100 ms), reflétant l'évolution de l'erreur entre deux instants pour détecter la dynamique du système.

2. **Fuzzification :**

   Dans cette étape, des fonctions d'appartenance triangulaires sont utilisées pour représenter les deux entrées du système : l'erreur $e(t)$ et sa variation $\Delta e(t)$, définies respectivement sur les intervalles $[-6, 6]$ et $[-3, 3]$, comme illustré dans la figure III.39 et III.40. En revanche, les sorties K_p et K_i, modélisées à l'aide de *singletons* conformément à la méthode de Sugeno, sont représentées dans la figure III.41.Les sous-ensembles flous correspondant à ces variables sont décrits par les termes linguistiques : négatif grand (NG), négatif moyen (NM), négatif (N), zéro (Z), positif (PS), positif moyen (MP) et positif grand (PG).

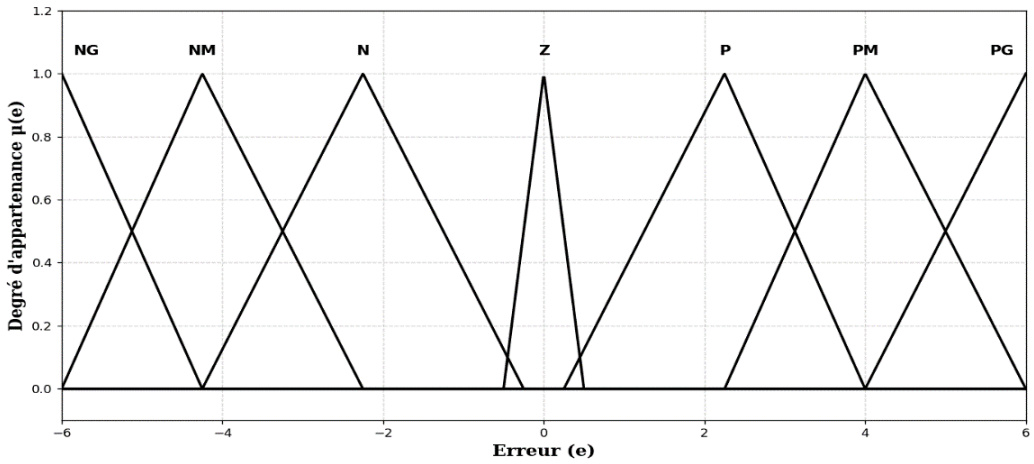


Figure III.39 : Fonctions d'appartenance de l'erreur e

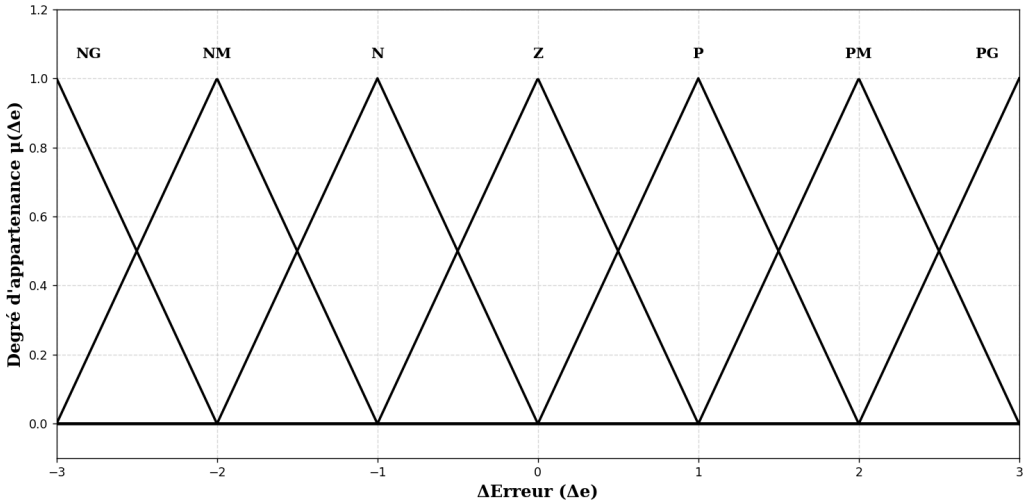


Figure III.40 : Fonctions d'appartenance de la variation de l'erreur Δe

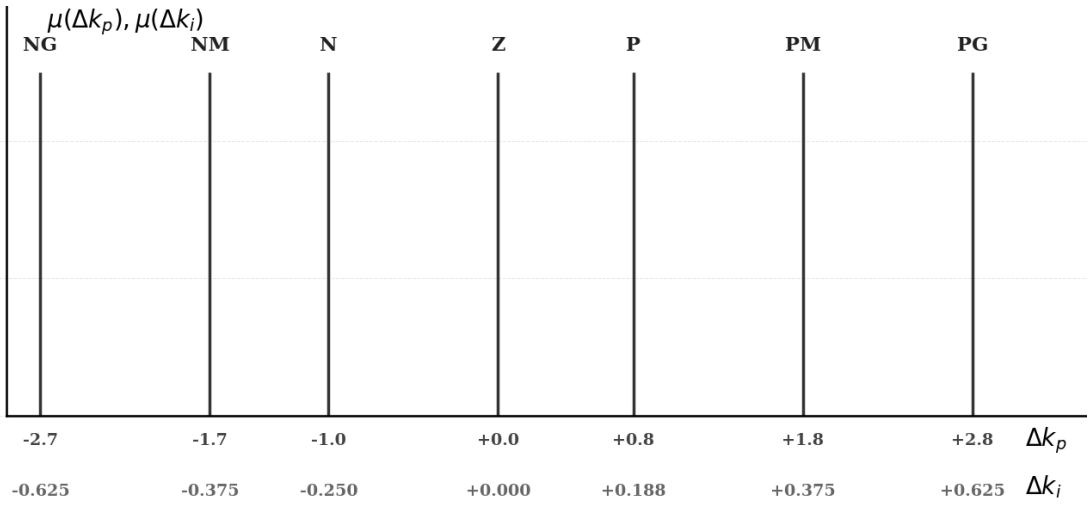


Figure III.41 : Fonctions d'appartenance des sorties (ΔK_p, ΔK_i)

Ce choix présente plusieurs avantages. Il est rapide à calculer, simple à interpréter et facile à ajuster. Le découpage en intervalles avec un recouvrement constant de 50 % permet une transition fluide entre les états flous, favorisant ainsi une adaptation progressive et stable des gains K_p et K_i, et évitant les sauts brusques dans la commande.

3. **Base de règles floues :**

Les règles floues ont été élaborées à partir d'une compréhension approfondie du système, en prenant en compte à la fois les aspects physiques du procédé et de la presse, ainsi que les observations réalisées lors du suivi des opérateurs en conditions réelles. Cette démarche combinée a permis de définir des règles adaptées au comportement réel de la machine.

Les tableaux III.42 et III.43 présentent respectivement les règles floues utilisées pour l'ajustement des gains K_p et K_i.

Figure III.42 : Règles floues pour le gain K_p

e \ Δe	NG	NM	N	Z	P	PM	PG
PG	Z	Z	NM	NM	NM	NG	NG
PM	N	Z	N	NM	NM	NM	NG
P	P	P	Z	N	N	NM	NM
Z	PM	PM	P	Z	N	NM	NM
N	PM	PM	PM	P	Z	N	N
NM	PG	PG	PM	P	P	Z	N
NG	PG	PG	PM	PM	P	Z	Z

Figure III.43 : Règles floues pour le gain K_i

e \ Δe	NG	NM	N	Z	P	PM	PG
PG	Z	Z	NM	NM	NM	NG	NG
PM	N	Z	N	NM	NM	NM	NG
P	P	P	Z	N	N	NM	NM
Z	PM	PM	P	Z	N	NM	NM
N	PM	PM	PM	P	Z	N	N
NM	PG	PG	PM	P	P	Z	N
NG	PG	PG	PM	PM	P	Z	Z

4. **Défuzzification :**

La méthode de défuzzification utilisée est celle du centre de gravité (centroid method). Elle consiste à calculer la moyenne pondérée des centres des ensembles flous de sortie, en tenant compte de leur degré d'activation. Cette technique permet d'obtenir une valeur numérique continue, précise et stable, parfaitement adaptée à l'ajustement en temps réel des gains PID. Elle assure ainsi une transition fluide entre les différentes actions de régulation, évitant toute rupture ou instabilité dans le comportement du système.

La défuzzification par la méthode du centre de gravité consiste à calculer la valeur de sortie z_0 comme la moyenne pondérée des éléments de l'ensemble flou, en tenant compte de leur degré d'appartenance respectif. Elle est donnée par la formule suivante :

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_i(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i(z_i)} \tag{III.2}$$

où :

- z_0 : est la valeur défuzzifiée (sortie numérique),
- z_i : la valeur singleton de sortie de la règle i,
- $\mu(z_i)$: est le degré d'appartenance (ou d'activation) correspondant à chaque z_i.

III.5.4.4 Implémentation du PID adaptatif :

L'implémentation du PID adaptatif a été réalisée en suivant plusieurs étapes essentielles afin d'assurer une communication fiable entre le PLC et le client Python.

Étape 1 : Activation du serveur OPC UA dans le PLC via TIA Portal

Dans TIA Portal, on accède aux paramètres de l'automate S7-1500 via le menu de configuration de l'appareil. Dans la section dédiée à la communication, l'option OPC UA est activée en cochant la case correspondante. Il est également nécessaire de configurer le port, de définir les certificats de sécurité si besoin, et de s'assurer que les connexions externes sont autorisées. Enfin, il convient de vérifier que le service OPC UA est bien démarré. Cette configuration est illustrée à la figure III.44.

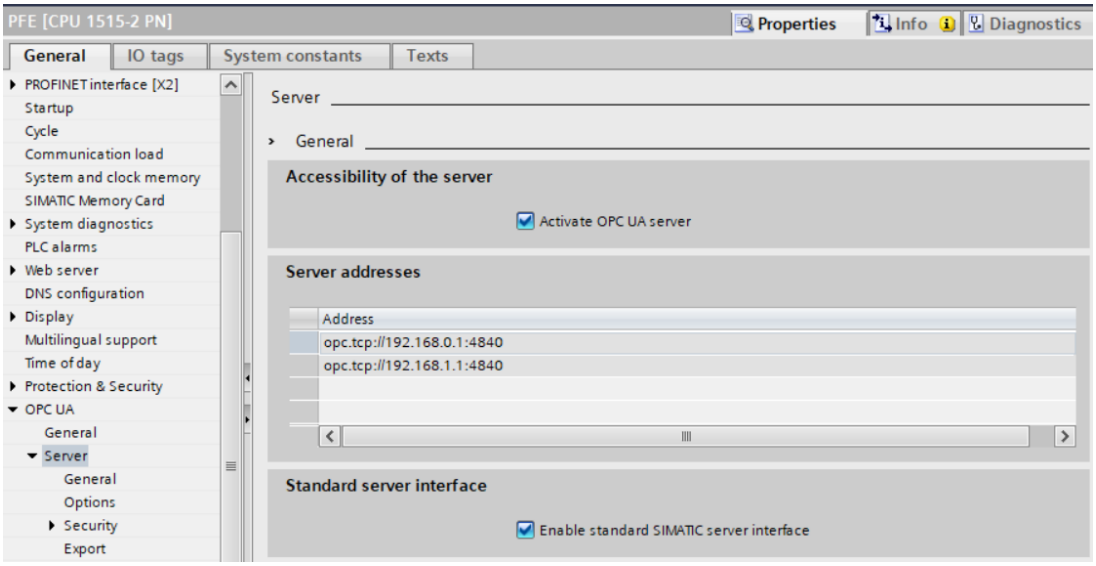


Figure III.44 : Activation du serveur OPC UA dans le PLC via TIA Portal

Étape 2 : Connexion au serveur OPC UA via UA Expert

Dans UA Expert, lancer l'application puis établir une connexion avec l'automate à l'adresse OPC UA spécifiée : `opc.tcp://192.168.0.1:4840`.
Cette étape permet de vérifier l'accessibilité du serveur et d'explorer les nœuds disponibles. Elle est illustrée à la figure III.45.

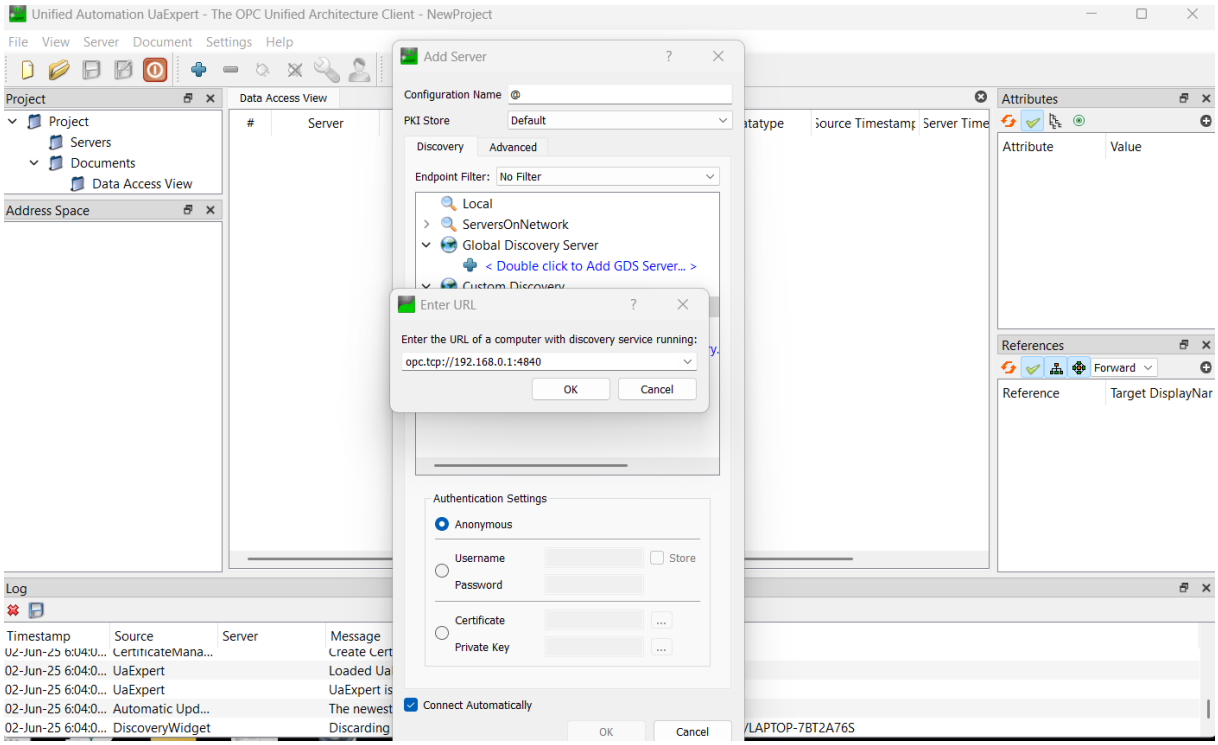


Figure III.45 : Connexion au serveur OPC UA via UA Expert

Étape 3 : Suivi en temps réel des variables du PLC dans UA Expert

Après avoir établi la connexion, naviguer dans l'arborescence du serveur pour identifier les variables du PLC exposées. Glisser-déposer les variables souhaitées dans la zone de surveillance (Data Access View) afin d'observer leur évolution en temps réel. Cette opération permet de vérifier le bon échange de données entre le contrôleur et l'environnement OPC UA, comme illustré à la figure III.46.

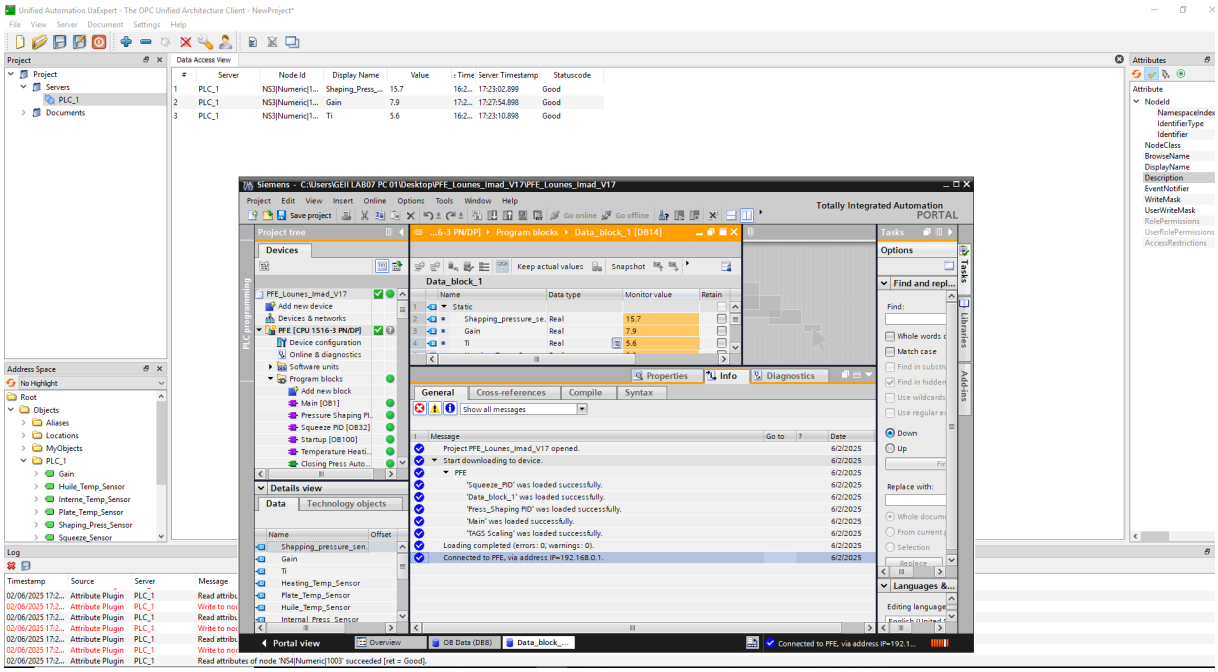


Figure III.46 : Suivi en temps réel des variables du PLC dans UA Expert

Étape 4 : Connexion pour lecture et écriture des données via un contrôleur flou en Python

Cette étape consiste à établir une communication entre le programme Python et le serveur OPC UA de l'automate, permettant la lecture et l'écriture des données nécessaires au fonctionnement du contrôleur flou. Le script Python (figure III.47) se connecte au serveur, accède aux nœuds OPC UA correspondant aux variables du système (capteurs, consignes, gains K_p et K_i), et échange les informations en temps réel. Cette interface assure ainsi le pilotage dynamique du régulateur flou directement depuis l'environnement Python.

```python
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz
from skfuzzy import control as ctrl
import time
from opcua import Client

# 🔌 Connexion au serveur OPC UA
PLC_IP = "opc.tcp://192.168.0.1:4840"
client = Client(PLC_IP)
client.connect()
print("✅ Connecté au serveur OPC UA")

# 🔹 Nœuds OPC UA
sensor_node = client.get_node("ns=3;i=1002")      # Valeur capteur
setpoint_node = client.get_node("ns=3;i=1005")    # Consigne
kp_node = client.get_node("ns=3;i=1006")          # Kp
ti_node = client.get_node("ns=3;i=1009")          # Ti

```

Figure III.47 : Connexion pour lecture et écriture des données via un contrôleur flou en Python

III.5.4.5 Analyse des réponses du système : PID classique vs PID adaptative floue

Les figures III.48 et t III.49 illustrent respectivement la réponse du système avec un régulateur PID classique et un régulateur PID adaptatif flou. Elles montrent l'évolution de la pression de formage(shaping) durant le cycle, permettant une comparaison visuelle des performances. Les valeurs initiales de K_p et K_i ont été déterminées automatiquement par autotuning (figure III.27).

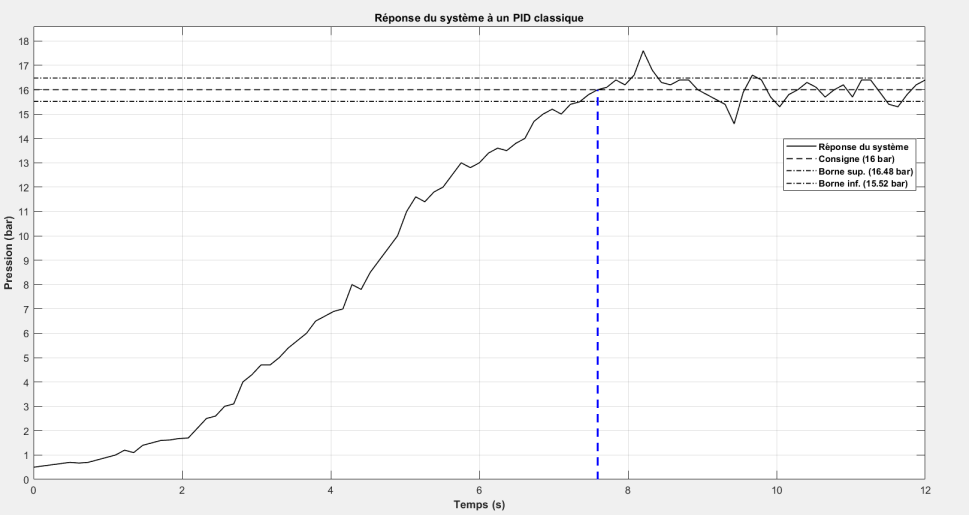


Figure III.48 : Réponse du Système à un PID Classique (Kp=8.5,Ki=1.5)

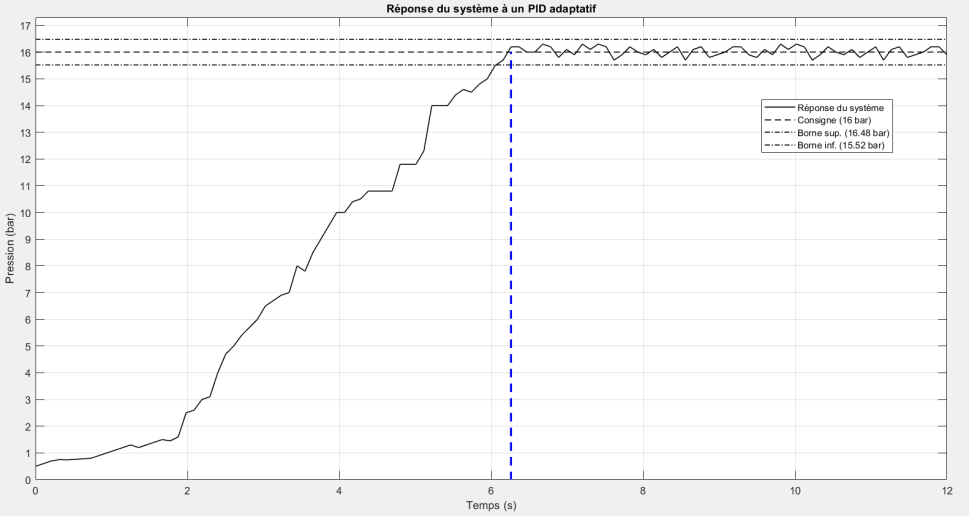


Figure III.49 : Réponse du Système à un PID Adaptative (Kp=8.5,Ki=1.5 initiaux)

III.5.4.6 Interprétation des résultats

L'intégration d'un régulateur PID flou pour le contrôle de la pression de formage pendant le cycle de vulcanisation s'est révélée pertinente et efficace. Comparée à la régulation classique à gains fixes, cette solution permet une réduction notable du temps de réponse, tout en limitant significativement le dépassement. Le système parvient à maintenir la pression au point de consigne avec une précision de $\pm 3\,\%$, et les oscillations restent très faibles, ce qui atteste d'une bonne stabilité.

Temps de réponse :

- Régulateur PI flou : $\Delta t = 6.26$s
- Régulateur PI classique : $\Delta t = 7.6$s

À la fin de chaque cycle, les valeurs initiales des gains K_p et K_i sont automatiquement restaurées, la fiabilité globale repose sur une architecture de commande hybride, le bloc PID est exécuté localement sur l'automate, garantissant réactivité et intégration optimale au cycle de fonctionnement, et en parallèle, le module flou est hébergé sur un client Python externe, chargé d'ajuster dynamiquement les paramètres de régulation via une communication OPC UA

III.5.5 Gestion des alarmes

La gestion des alarmes permet d'identifier rapidement toute anomalie susceptible d'interrompre le cycle de vulcanisation. Chaque alarme est déclenchée en fonction de conditions précises, telles qu'un dépassement de seuil temporel, une valeur hors plage (pression, température) ou l'absence de signal d'un capteur. La logique est programmée en langage LADDER, avec la possibilité de regrouper les états d'alarme un bit global, facilitant ainsi leur affichage sur l'IHM.

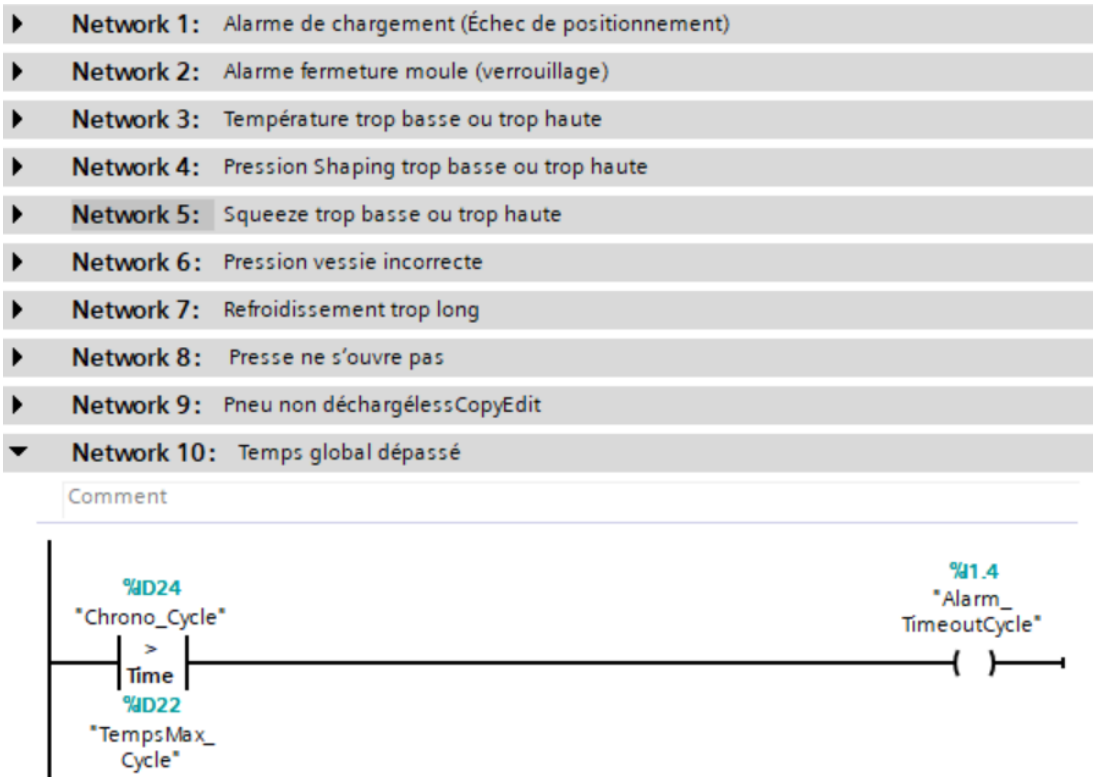


Figure III.50 : Configuration des Réseaux d'Alarme dans TIA Portal

III.5.6 Comptage des pneus et gestion des shifts

Le comptage des pneus suit la production en temps réel durant chaque shift. Le compteur s'incrémente à chaque dépôt de pneu et se réinitialise automatiquement à 06h00, 14h00 et 22h00.

Pour garantir un comptage précis, un front montant est utilisé afin de ne réagir qu'une seule fois au changement d'horaire. Les valeurs enregistrées avant chaque réinitialisation sont stockées dans des registres distincts pour chaque shift, facilitant ainsi leur affichage et leur suivi sur l'IHM.

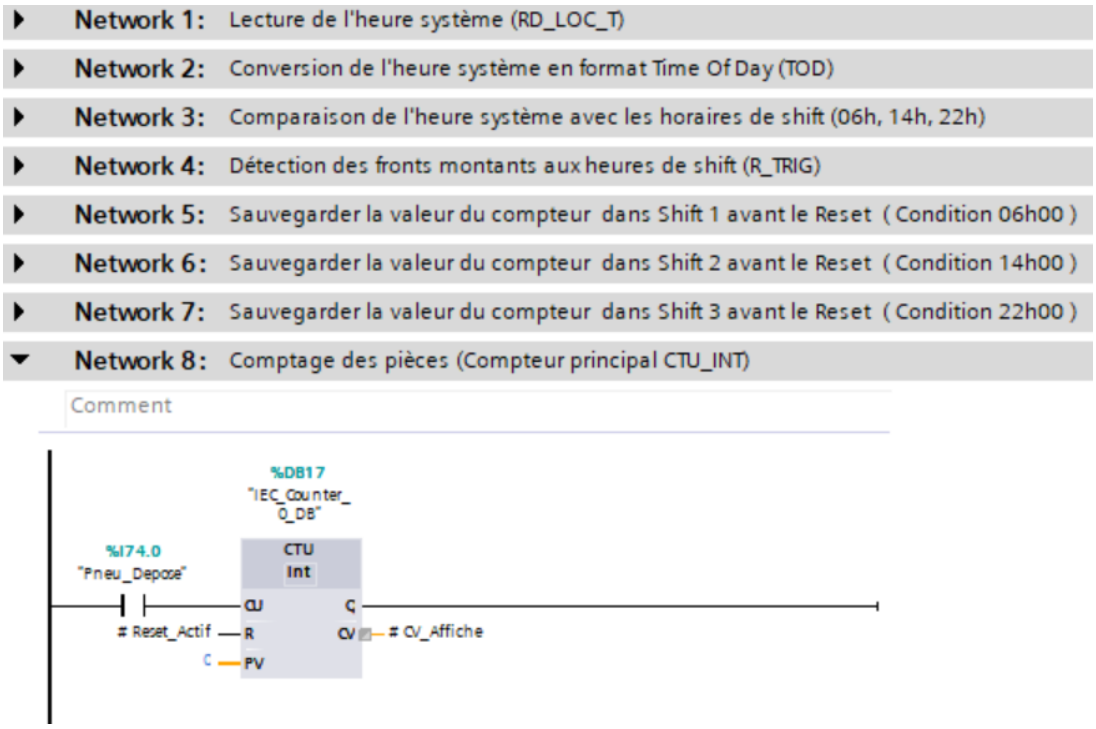


Figure III.51 : Programme de comptage des pneus par shift

III.6 Conclusion

Ce chapitre a démontré l'efficacité de la commande PID floue implémentée dans le processus de vulcanisation, mais également détaillé l'ensemble des étapes de mise en œuvre, depuis la configuration initiale jusqu'à l'évaluation comparative des performances. Dans un premier temps, la programmation dans TIA Portal a permis de mettre en place la régulation PID classique à l'aide des blocs PID disponibles dans l'environnement Siemens, avec la fonctionnalité d'auto-tuning offrant une première optimisation automatique des paramètres Kp, Ki et Kd. Cette approche a servi de base pour la stabilisation de la pression dans la vessie. Par la suite, une architecture plus évoluée a été mise en œuvre avec un PID adaptatif connecté à un contrôleur flou développé en Python, communiquant en temps réel via le serveur OPC UA intégré au PLC S7-1500. Cette communication bidirectionnelle a permis l'ajustement dynamique des gains en fonction des conditions de fonctionnement. Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une réduction du temps de stabilisation de la pression (de 7,6 s à 6,26 s) tout en respectant les contraintes de sécurité. Enfin, la gestion des alarmes et le système de comptage automatisé des pneus ont complété l'architecture, assurant une supervision fiable et continue du processus industriel.

Afin de compléter cette architecture de régulation avancée, le chapitre suivant est consacré au développement des interfaces de supervision, en combinant une IHM avec un système SCADA web multiplateforme pour assurer un pilotage optimal et sécurisé du processus.

Chapitre IV

Développement de l'IHM et de l'interface SCADA

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les plateformes de supervision mises en œuvre dans le cadre du projet, à savoir l'HMI et le système SCADA conçu avec Node-RED et MongoDB. Ces outils assurent une surveillance en temps réel, un contrôle efficace et une interaction fluide avec le processus de vulcanisation. L'HMI permet une exploitation locale via le panneau TP900 Comfort, tandis que l'interface SCADA offre un accès distant, sécurisé et multiplateforme aux données critiques. Le développement, la configuration des écrans, la gestion des utilisateurs, la visualisation des paramètres industriels, ainsi que la sécurisation et l'accessibilité du système, sont détaillés. Des tests de validation ont permis de confirmer la performance, la fiabilité et l'adéquation de ces solutions avec les exigences industrielles du site IRIS Tyres.

IV.2 Interface Homme-Machine (HMI)

L'HMI joue un rôle clé dans le processus d'automatisation en assurant la communication entre l'opérateur et la presse de vulcanisation. Dans le cadre de notre projet, cette interface est réalisée à l'aide du panneau TP900 Comfort, configuré avec WinCC Advanced dans TIA Portal. Elle permet à l'utilisateur de visualiser en temps réel l'état de fonctionnement de la machine, de suivre les alarmes actives, de saisir des consignes de production et de contrôler manuellement ou automatiquement le cycle de vulcanisation. L'interface a été conçue avec une organisation claire et intuitive des écrans afin de faciliter l'utilisation et de garantir un pilotage efficace et sécurisé du système

IV.2.1 Configuration des variables HMI

Dans le projet WinCC Advanced, les variables HMI assurent la communication entre l'automate S7-1500 et le panneau opérateur TP900 Comfort. Chaque variable est liée à une adresse précise dans le programme automate, garantissant la cohérence entre la logique de commande et l'interface opérateur. La Figure IV.1 illustre un exemple de variables HMI utilisées dans le projet.

HMI tags

Name	Tag table	Data type	Connection	PLC name	PLC tag
Counter_Shift_Compteur_Shift...	Counter	Int	HMI_Connectio...	PFE	Counter_Shift.Compteur...
Counter_Shift_Compteur_Shift...	Counter	Int	HMI_Connectio...	PFE	Counter_Shift.Compteur...
Counter_Shift_Compteur_Shift...	Counter	Int	HMI_Connectio...	PFE	Counter_Shift.Compteur...
Loader Mode Switch	Mode_Marche	Bool	HMI_Connectio...	PFE	"Loader Mode Switch"
Presse Mode Switch	Mode_Marche	Bool	HMI_Connectio...	PFE	"Presse Mode Switch"
Pressure Closing Scaling_DB_Cl..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Pressure Closing Scaling..
Pressure Internal Scaling_DB_In..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Pressure Internal Scaling.
Pressure Shaping Scaling_DB_S..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Pressure Shaping Scalin...
Temperature Heating Scaling_...	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Temperature Heating Sc..
Temperature Huile Scaling_DB_..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Temperature Huile Scali...
Temperature Interne Scaling_D..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Temperature Interne Sca..
Temperature Plate Scaling_DB_..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Temperature Plate Scalin..
Temperature Segment Scaling_..	Parametres	Real	HMI_Connectio...	PFE	"Temperature Segment S..
Unloader Mode Switch	Mode_Marche	Bool	HMI_Connectio...	PFE	"Unloader Mode Switch"

Figure IV.1 : Exemple de configuration des variables HMI

IV.2.2 Configuration des alarmes

Dans le projet de supervision sous WinCC Advanced, les alarmes permettent de détecter, signaler et enregistrer les anomalies survenues durant le fonctionnement de la presse, selon des conditions logiques définies dans l'automate. En cas d'alarme, l'HMI affiche un message clair indiquant la nature du problème afin de guider l'opérateur. La Figure IV.2 illustre un exemple de table d'alarmes.

	ID	Name	Alarm text	Alarm class	Trigger tag	Trigge..	Trigger address	HMI acknowl...
	1	Alarm_Chargement	Échec de positionnement du pneu (	Warnings	Alarm_Charg...	0	Alarm_Charg...	<No tag>
	2	Alarm_Verrouillage	Défaut de verrouillage du moule	Errors	Alarm_Verrou...	0	Alarm_Verrou...	<No tag>
	3	Alarm_Temp_Basse..	Température de cuisson trop basse	Errors	Alarm_Temp...	0	Alarm_Temp...	<No tag>
	4	Alarm_Temp_Haute	Température de cuisson trop élevée	Errors	Alarm_Temp...	0	Alarm_Temp...	<No tag>
	11	Alarm_Press_Basse	Pression shaping trop basse	Errors	Alarm_Press_...	0	Alarm_Press_...	<No tag>
	10	Alarm_Press_Haute	Pression shaping trop haute	Errors	Alarm_Press_...	1	Alarm_Press_...	<No tag>
	12	Alarm_Squeeze_Ba...	Force Squeeze trop basse	Errors	Alarm_Squee...	1	Alarm_Squee...	<No tag>
	13	Alarm_Squeeze_Ha...	Force Squeeze trop haute	Errors	Alarm_Squee...	1	Alarm_Squee...	<No tag>
	5	Alarm_PressionVes...	Pression vessie insuffisante	Errors	Alarm_Pressi...	0	Alarm_Pressi...	<No tag>
	6	Alarm_Vidange	Temps de vidange dépassé	Errors	Alarm_Vidange	0	Alarm_Vidan...	<No tag>
	7	Alarm_Ouverture	Le moule ne s'ouvre pas	Errors	Alarm_Ouver...	0	Alarm_Ouver...	<No tag>
	8	Alarm_Dechargem...	Pneu non retiré de la presse	Errors	Alarm_Decha...	0	Alarm_Decha...	<No tag>
	9	Alarm_TimeoutCycle	Durée du cycle dépassée	Errors	Alarm_Timeo...	0	Alarm_Timeo...	<No tag>

Figure IV.2 : Exemple de table d'alarmes

IV.2.3 Gestion des utilisateurs

La gestion des utilisateurs organise l'accès à la supervision selon trois profils :administrateurs,superviseurs et utilisateurs. Chaque profil dispose de droits spécifiques, garantissant que seules les personnes habilitées peuvent effectuer certaines actions, conformément au cahier des charges. Cela est illustré à la Figure IV.3.

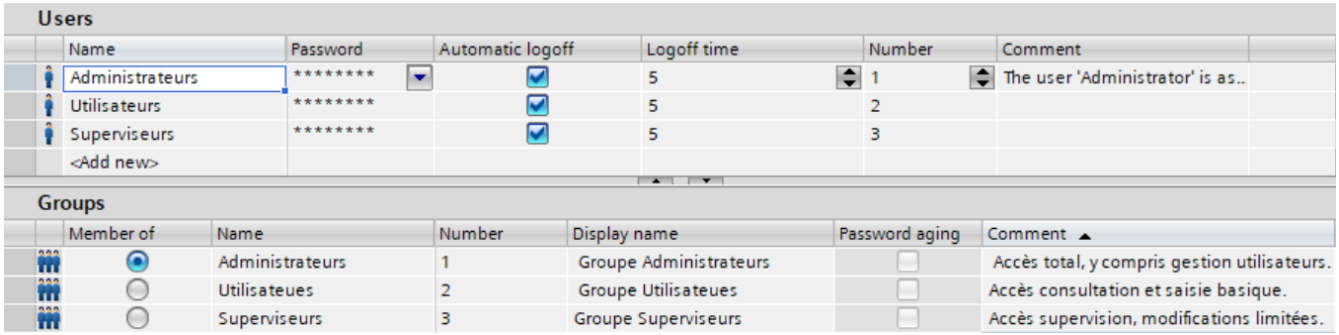


Figure IV.3 : Configuration des profils et droits d'accès utilisateur

IV.2.4 Configuration des vues de l'IHM

La configuration des vues de l'IHM permet d'organiser l'interface opérateur en écrans distincts, adaptés aux différentes tâches. Dans notre projet, l'IHM comporte plusieurs vues, chacune regroupant des éléments spécifiques selon leur fonction, afin de faciliter la navigation et l'exploitation de la presse.

1. **Vue d'accueil :**

   La figure IV.4 présente la vue d'accueil, qui offre à l'utilisateur un accès centralisé à toutes les autres vues de l'interface, facilitant la navigation et la gestion du système.

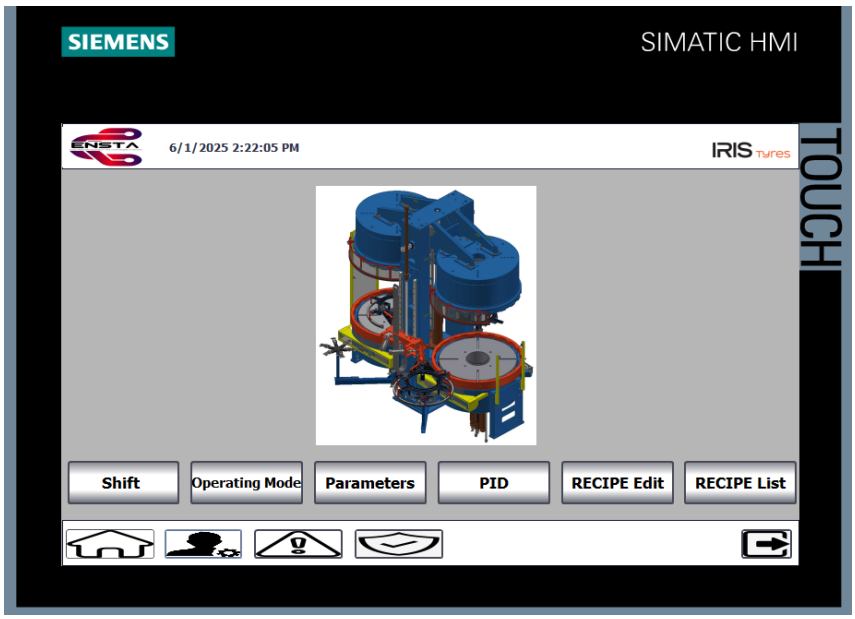


Figure IV.4 : Vue d'accueil

2. **Vue des alarmes :** Cette vue (Figure IV.5) permet l'affichage en temps réel des alarmes générées par l'automate. Elle informe l'opérateur des anomalies survenues, facilitant leur identification et leur traitement rapide.

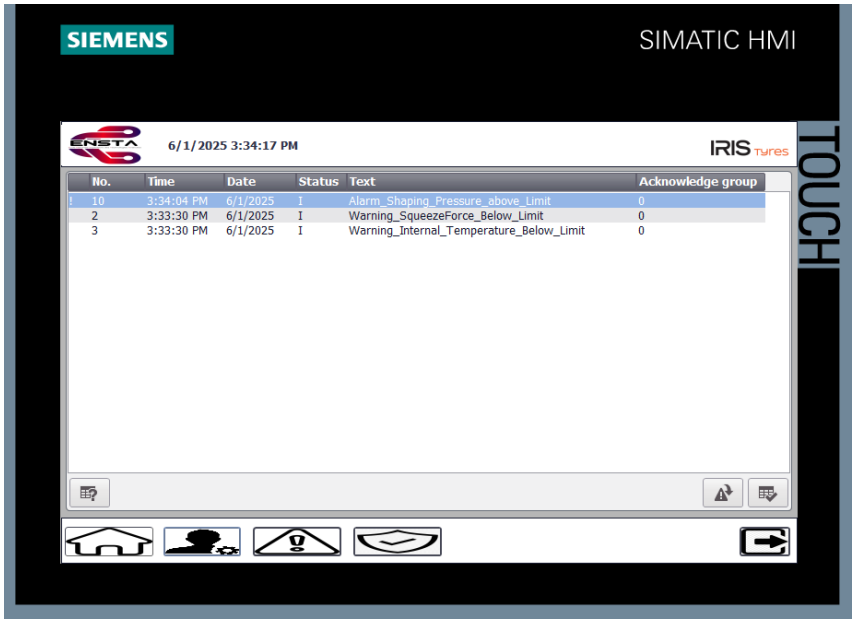


Figure IV.5 : Vue d'alarmes

3. **Vue Gestion des utilisateurs :** Les figures IV.6 et IV.7 présentent respectivement l'écran de connexion et l'interface de gestion des droits d'accès, permettant une sécurisation adaptée à chaque profil utilisateur (administrateur, superviseur, utilisateur).



Figure IV.6 : Vue de l'écran de connexion

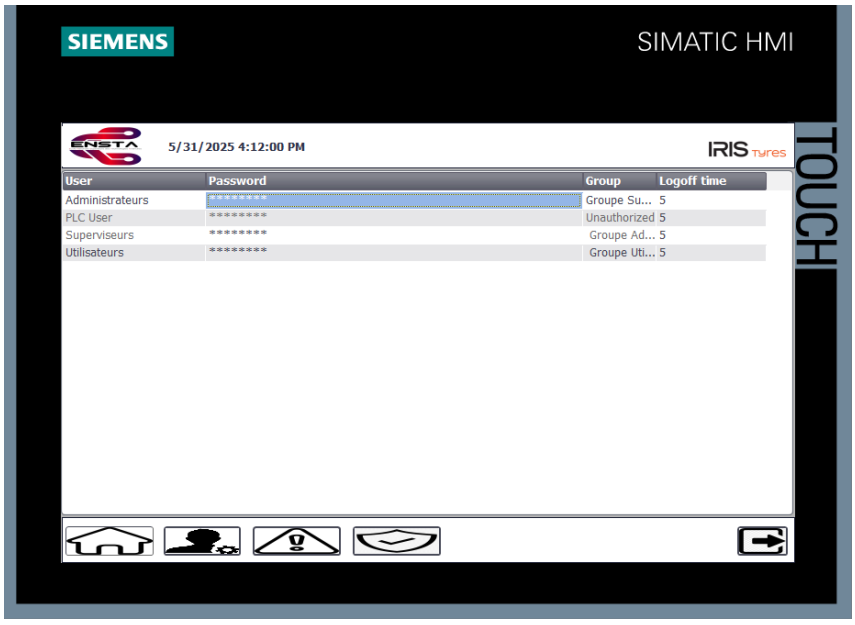


Figure IV.7 : Vue de gestion des utilisateurs

4. **Vue du compteur par shift :** Cette vue (Figure IV.8) affiche le nombre de pneus produits durant chaque shift (06 h–14 h, 14 h–22 h, 22 h–06 h). Elle permet de suivre la production selon les horaires de travail des opérateurs.

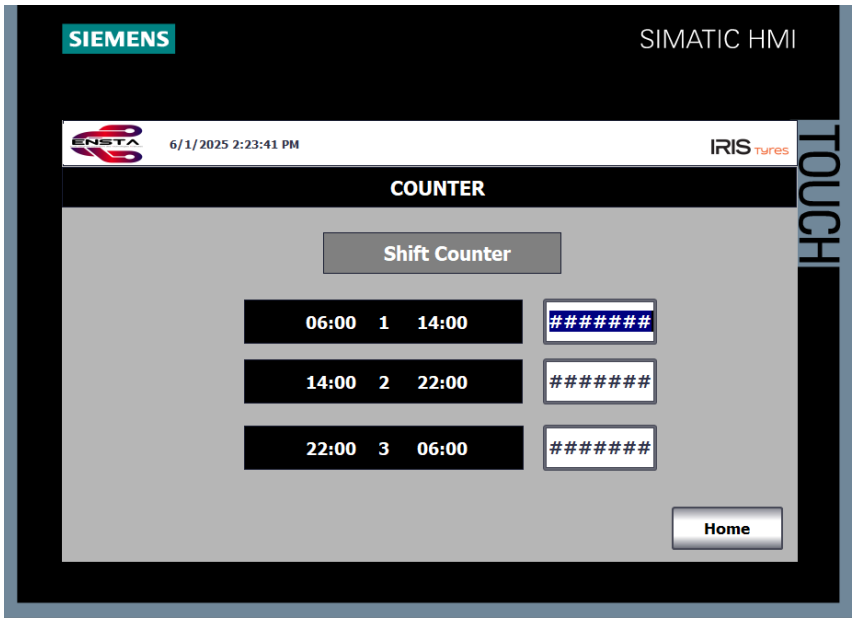


Figure IV.8 : Vue du compteur par shift

5. **Vue des modes de fonctionnement :** Cette vue (Figure IV.9) permet de sélectionner et d'afficher le mode de marche (automatique ou manuel) de la presse, du loader et de l'unloader. Elle facilite la commutation entre modes en fonction des besoins de production ou de maintenance.

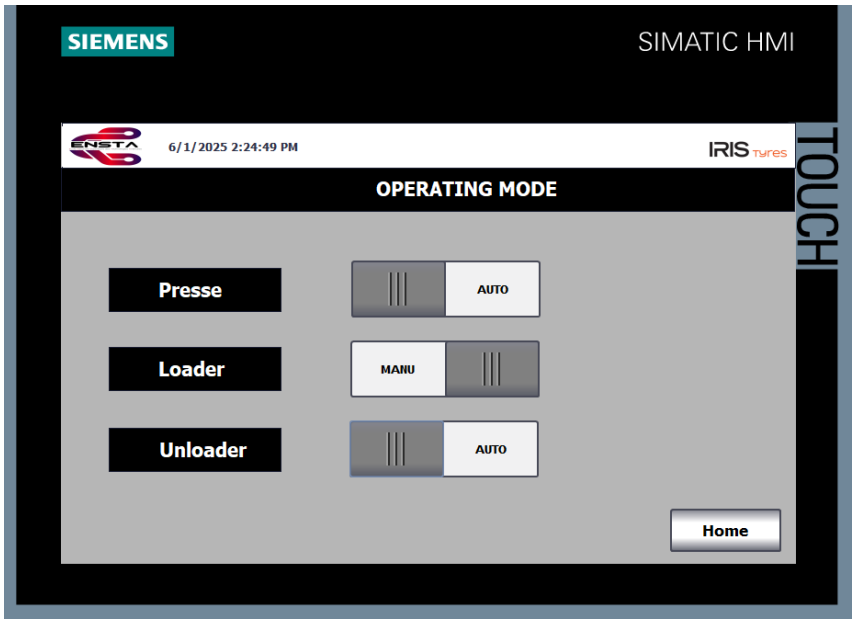


Figure IV.9 : Vue des modes de fonctionnement

6. **Vue des régulations PID (Heating, Shaping et Squeeze) :**

Cette vue (Figure IV.10) présente les consignes et paramètres des régulations PID pour la température (heating), la pression de moulage (shaping) et la pression de compression (squeeze). Elle permet de suivre et d'ajuster en temps réel le contrôle de ces grandeurs critiques.

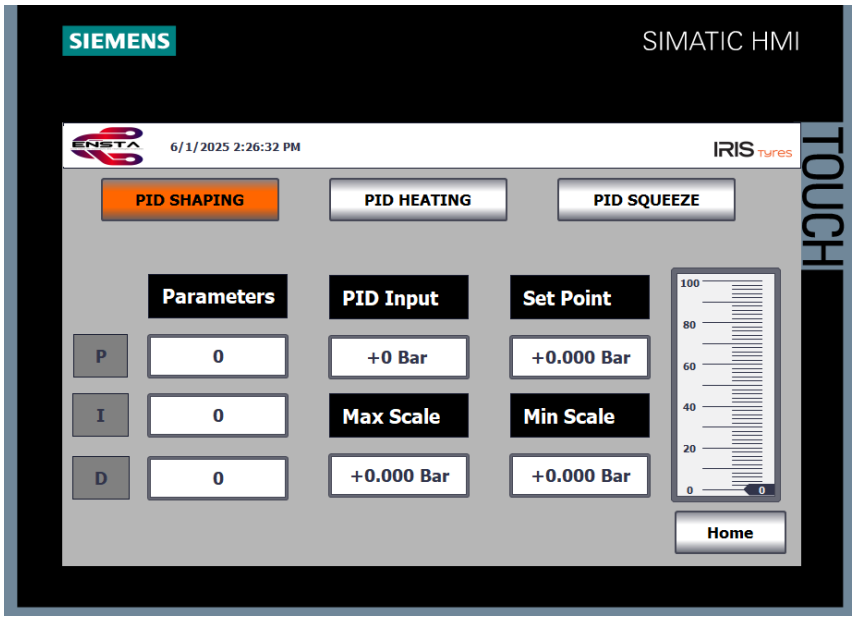


Figure IV.10 : Vue des régulations PID (Heating, Shaping et Squeeze)

7. **Vue Safety :**

La vue Safety (Figure IV.11) regroupe les commandes et indicateurs liés à la sécurité, notamment les boutons d'arrêt d'urgence et les dispositifs de protection, permettant une intervention rapide en cas de situation critique.

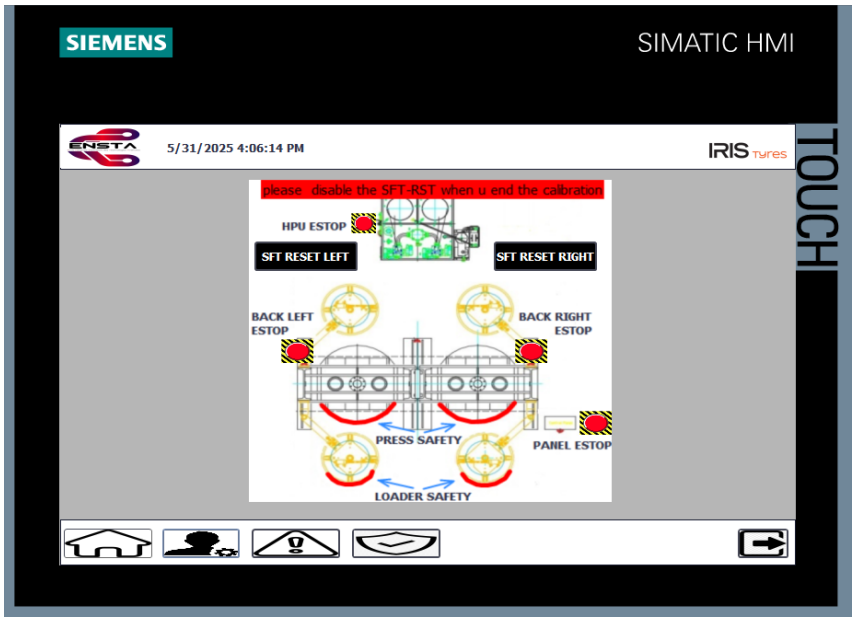


Figure IV.11 : Vue de sécurité (Safety)

8. **Vue des recettes sauvegardées :**

La figure IV.12 illustre l'ensemble des recettes, identifiées par leur nom, réparties selon les différentes gammes de pneus (ECORIS, SEFAR, STORMY, AURES, LANE). Chaque type de pneu dispose ainsi de sa recette spécifique, facilitant leur gestion et sélection.

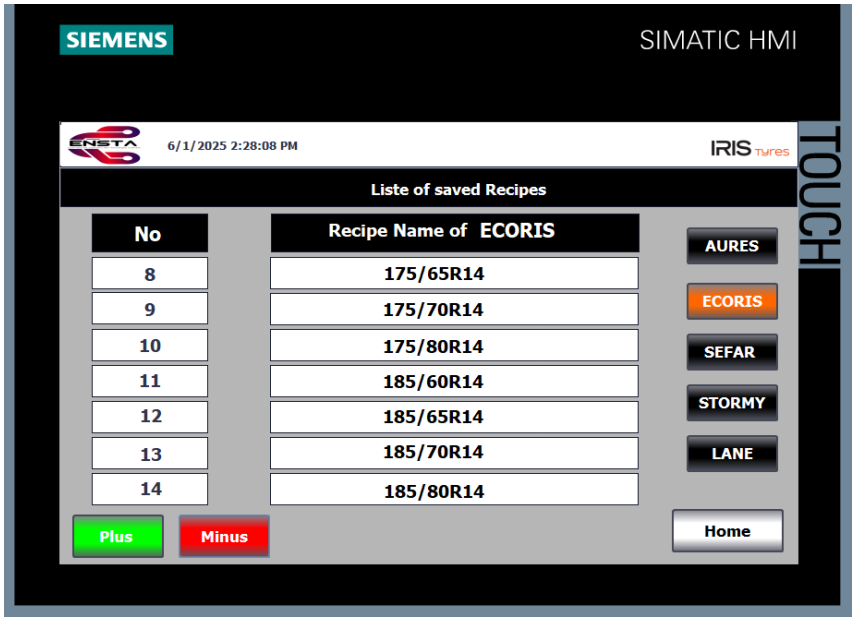


Figure IV.12 : Vue des recettes sauvegardées

9. **Vue gestion des recettes :**

La vue présentée dans la figure IV.13 permet de visualiser en temps réel les différentes températures et pressions mesurées par les capteurs.

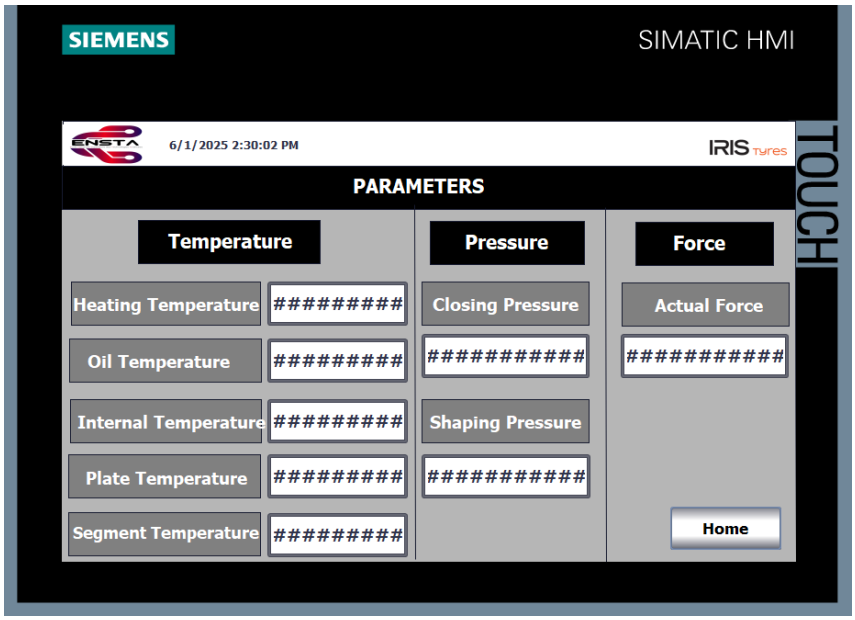


Figure IV.13 : Vue Parameters

10. **Vue gestion des recettes :**

    La figure IV.14 présente le choix du type de pneu à produire. Une fois sélectionné, le système génère automatiquement la recette correspondante, incluant les paramètres essentiels tels que la pression, la température et la phase de squeeze, facilitant ainsi une mise en route rapide et précise de la production.

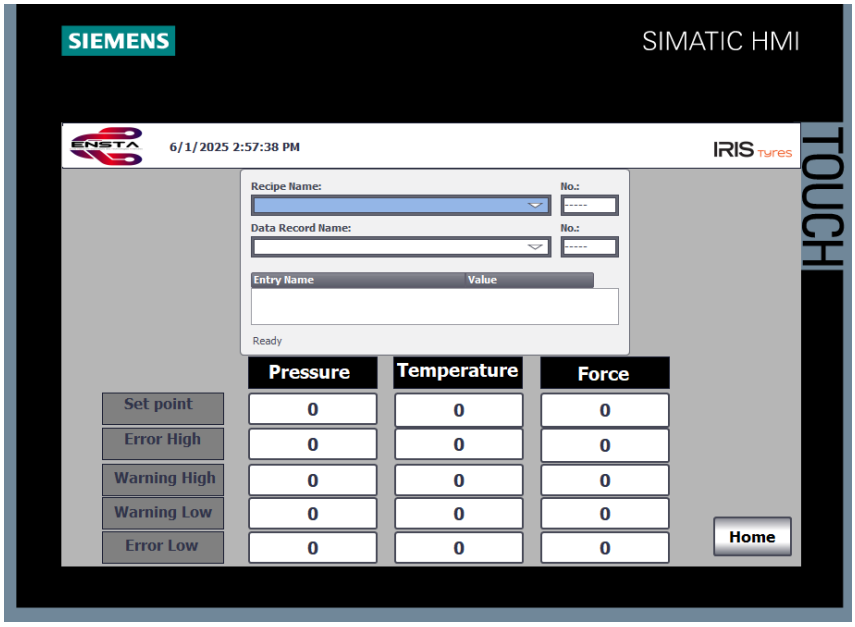


Figure IV.14 : Vue gestion des recettes

IV.3 Interface SCADA

IV.3.1 Introduction aux systèmes SCADA

Les systèmes SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) représentent des plateformes essentielles de supervision dans le domaine de l'automatisation industrielle. Leur fonction principale est d'assurer le suivi en temps réel, le contrôle des processus industriels, ainsi que l'acquisition de données critiques provenant du terrain. Ils assurent une interface entre les opérateurs et les équipements automatisés, et facilitent la visualisation des états de fonctionnement, la gestion des alarmes, ainsi que la prise de décision.Très utilisés dans des secteurs stratégiques tels que l'énergie, la fabrication ou l'automobile, les SCADA garantissent la stabilité des processus, la traçabilité des opérations et la réactivité face aux anomalies. Leur architecture (figure IV.15) repose sur l'intégration de capteurs, d'automates programmables industriels (PLCs), d'interfaces, ainsi que de protocoles de communication standardisés pour une supervision continue [42].

À l'usine Iris Tyres, le système SCADA assure la surveillance des machines , composées d'un ensemble de 32 presses réparties dans deux cellules (Cellule 1 et Cellule 2), des cycles de production, ainsi que des paramètres critiques tels que la pression de formage, la force de serrage et la température de cuisson.

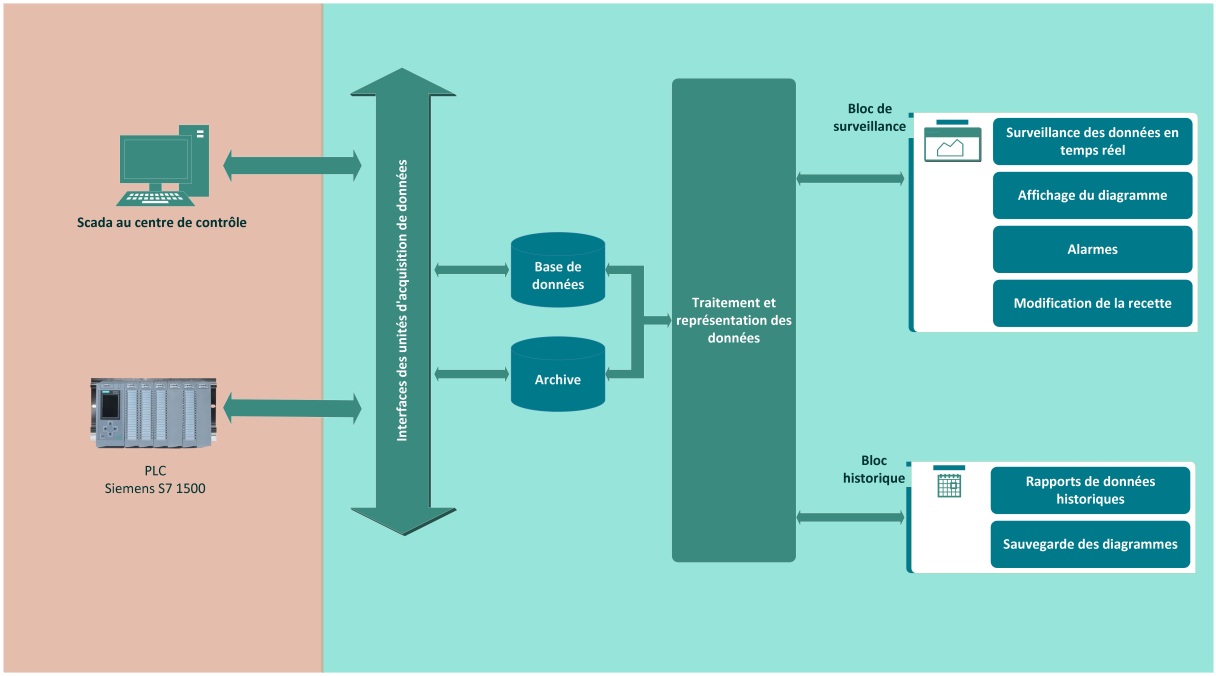


Figure IV.15 : Architecture de SCADA

IV.3.2 Environnement de développement : Node-RED

Node-RED est une plateforme de développement open source, fondée sur JavaScript et exécutée sur Node.js, conçue pour la programmation orientée flux. Elle offre une interface graphique intuitive (figure IV.16) , accessible via un navigateur web, permettant de concevoir rapidement des applications d'automatisation industrielle et des interfaces SCADA professionnelles. Grâce à son approche par flux, Node-RED facilite la création de chaînes de traitement de données en reliant le matériel aux logiciels. Cette architecture simplifie la collecte, le traitement et la transmission des données vers des systèmes de niveau supérieur ou des services cloud [43].

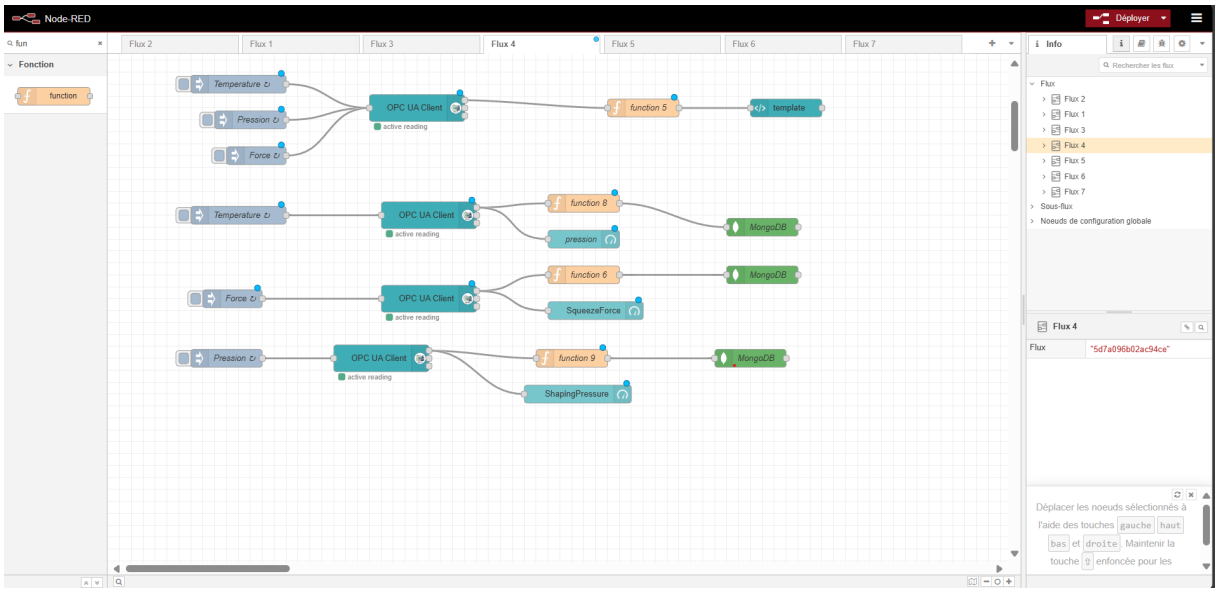


Figure IV.16 : Node-RED Dashbord bloc.

IV.3.3 Backend : Traitement et Gestion des Données

Le backend, implémenté à l'aide de Node RED, est chargé d'orchestrer le flux de données en temps réel, de gérer la communication via OPC UA, de traiter les données issues des capteurs (température, pression, force) ainsi que les alarmes, et d'assurer la logique entre les dispositifs industriels et les bases de données dans le cloud. Il constitue le cœur du système, garantissant une acquisition, une transformation, une validation et un stockage efficaces des données dans MongoDB [44]. La Figure IV.17 montre l'architecture du backend et les interactions entre ses principaux composants.

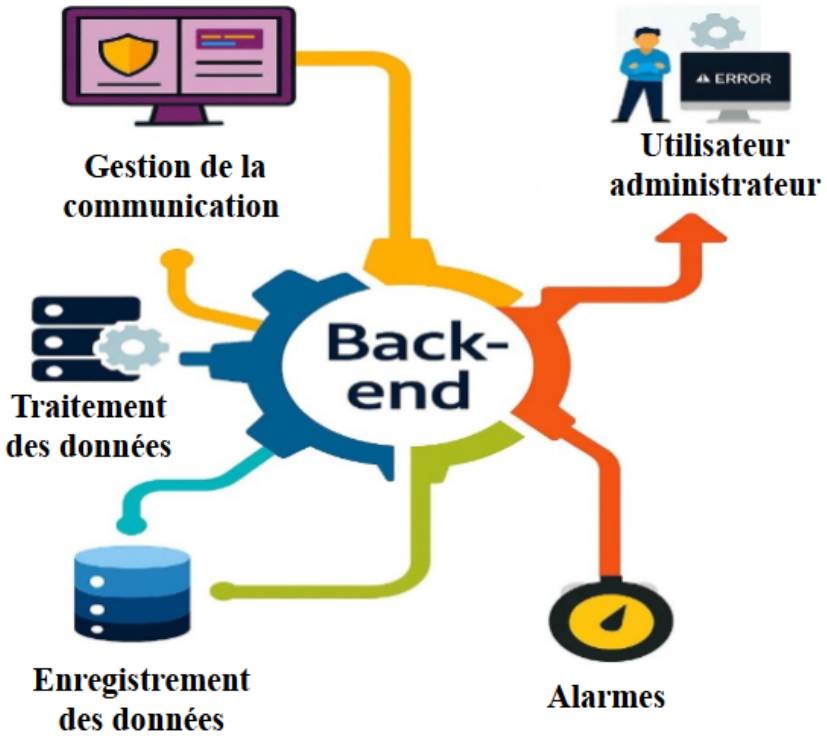


Figure IV.17 : Architecture du backend

IV.3.4 Stockage et Gestion des Données

En tant que base de données NoSQL, MongoDB est particulièrement adaptée à la gestion des données dynamiques et volumineuses générées par le système. Contrairement aux bases de données relationnelles traditionnelles, MongoDB offre une grande flexibilité dans la conception du schéma, permettant un stockage efficace de types de données variés. Cette architecture facilite l'enregistrement continu des mesures (comme la température, la pression ou la force), l'historisation des événements en temps réel, ainsi que la récupération rapide des données pour l'analyse, la traçabilité ou la visualisation sur le tableau de bord (figure IV.18) [45].

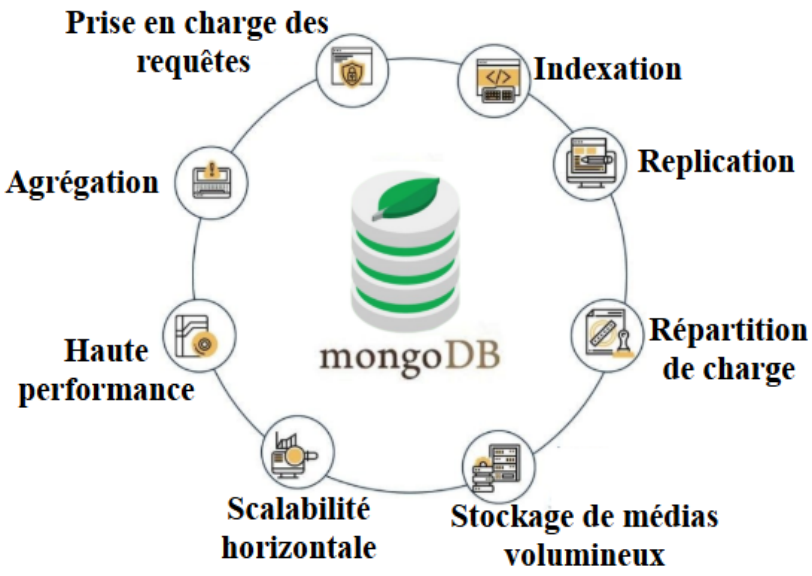


Figure IV.18 : Les principales fonctionnalités de MongoDB

IV.3.5 Scalabilité et Structure de Sauvegarde des Données

La scalabilité offerte par MongoDB garantit que le système peut gérer des volumes croissants de données sans dégradation des performances, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications industrielles à grande échelle. Grâce à sa structure flexible et orientée documents, MongoDB facilite l'organisation, la segmentation et l'accès rapide aux données, même lorsqu'elles sont générées en continu [45]. Pour une meilleure clarté dans le traitement et l'archivage des mesures collectées, le format de sauvegarde est présenté ci-dessous (figure IV.19).

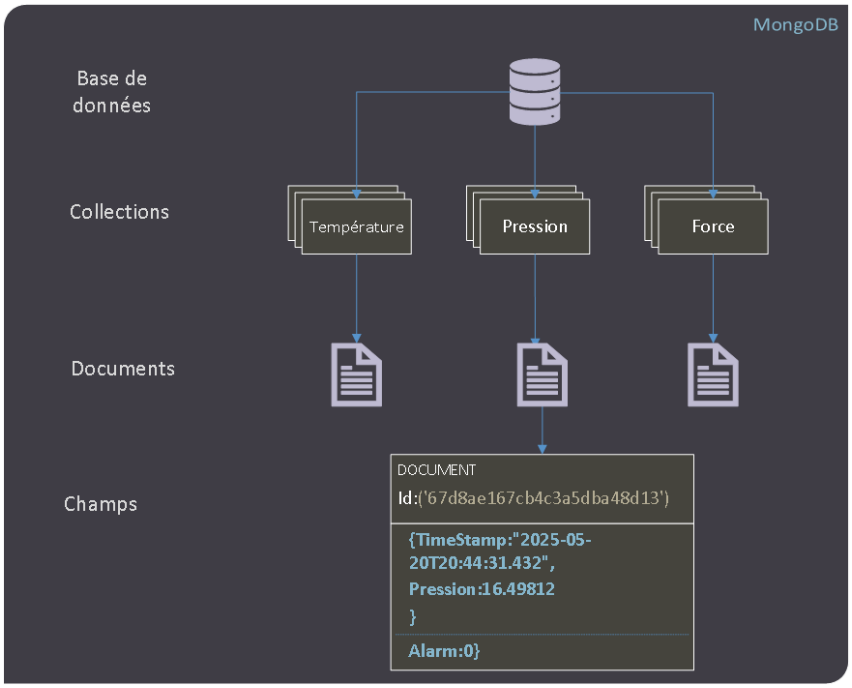


Figure IV.19 : format de sauvegarde

IV.3.6 Interface Utilisateur : Supervision et Visualisation (Frontend)

L'interface utilisateur a été développée à l'aide du module Dashboard de Node-RED, enrichie par des blocs personnalisés en HTML, CSS et JavaScript. Elle constitue le point d'accès central aux informations issues du terrain, à destination des opérateurs, techniciens et ingénieurs. Cette interface, structurée en onglets thématiques, facilite une navigation rapide et intuitive. Elle permet la supervision en temps réel des principaux paramètres du système, notamment : les mesures de température, de pression et de force, la détection des alertes, le suivi des états opérationnels des machines, ainsi que l'accès à des outils d'exportation des données. Grâce à cette approche, le système permet une visualisation claire, une interaction fluide et une supervision efficace des équipements industriels, accessible depuis n'importe quel navigateur web compatible (figure IV.20).

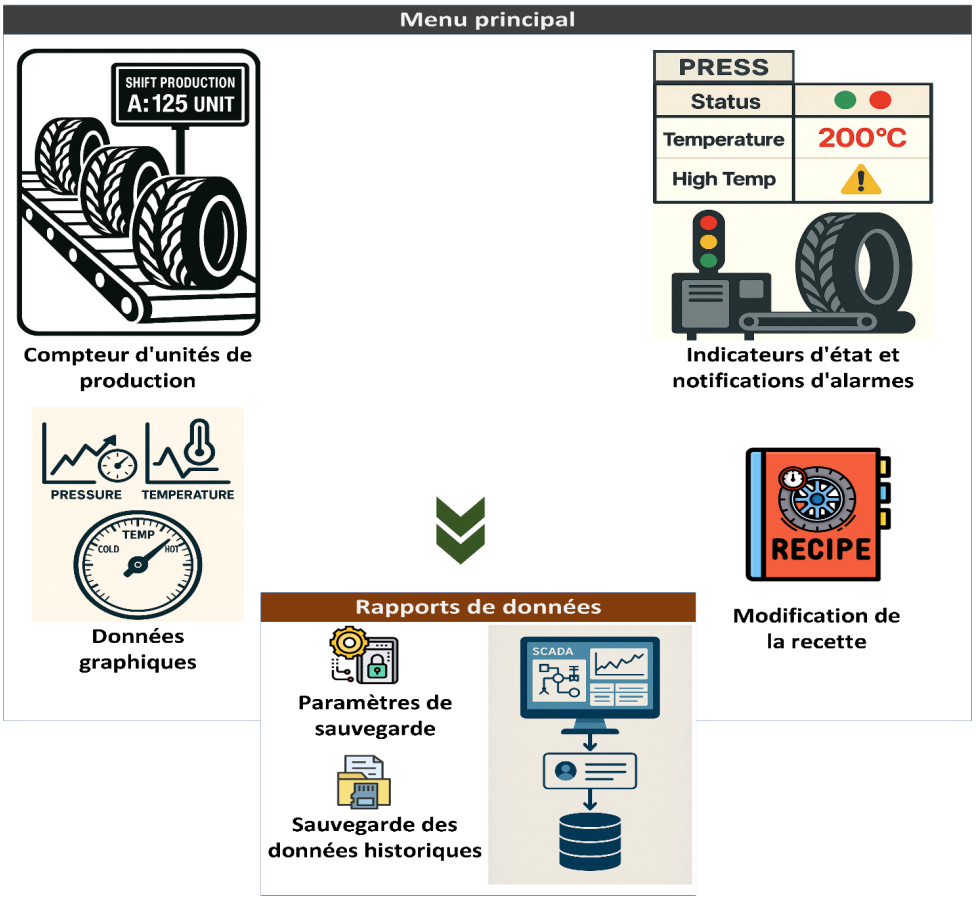


Figure IV.20 : Les éléments principaux du frontend

IV.3.7 Sécurité et Gestion des Accès :

Le système SCADA intègre une gestion sécurisée des utilisateurs, où chaque personne dispose d'un compte, d'un profil et d'un rôle spécifique (opérateur, technicien, administrateur, etc.) définissant ses droits d'accès. L'authentification est assurée par identifiant et mot de passe, avec la possibilité d'extensions vers une authentification forte. Les échanges de données sont protégés par des protocoles de chiffrement tels que HTTPS et TLS, et les accès aux informations sensibles sont strictement contrôlés.

IV.3.8 Compatibilité Multi-Plateforme et Accès Distant

Le système SCADA développé est entièrement responsive, permettant un accès depuis un PC, une tablette ou un smartphone. La supervision peut ainsi être réalisée à distance, en temps réel, comme illustré à la figure IV.21, qui montre l'affichage de l'interface sur un PC et un smartphone.

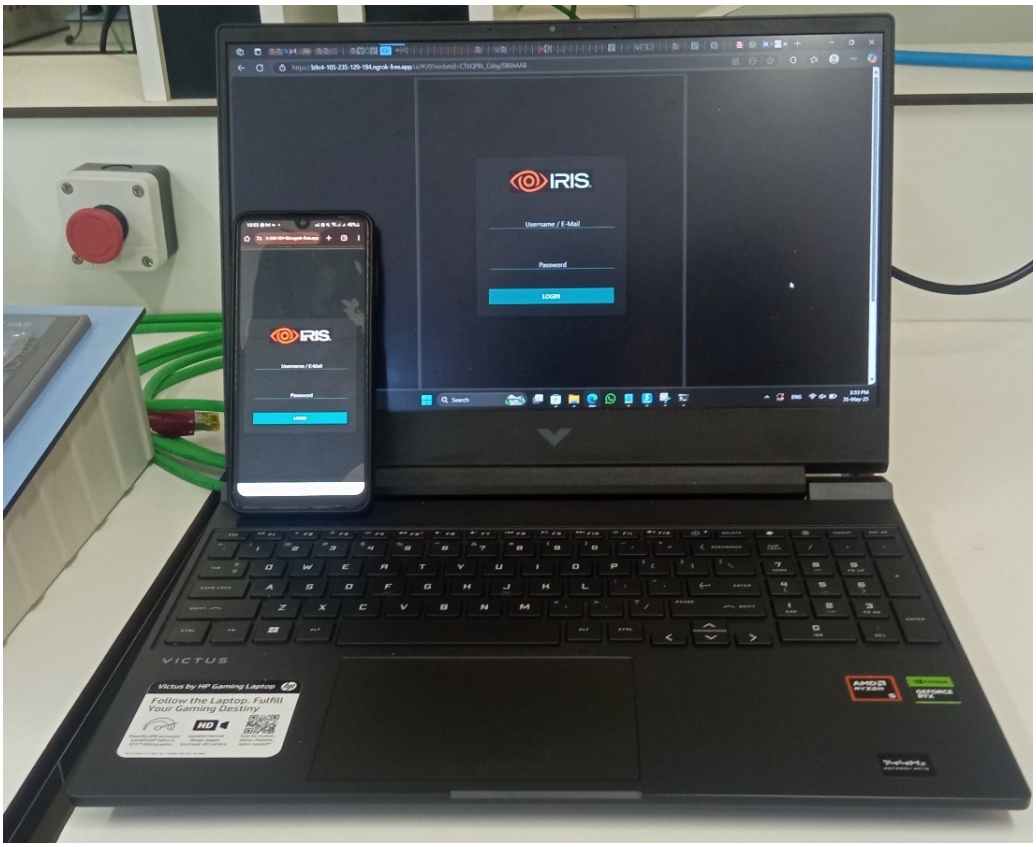


Figure IV.21 : l'Affichage de l'interface sur un PC et un Smartphone.

IV.3.9 Déploiement Sécurisé de l'Interface SCADA avec Ngrok

Afin de permettre un accès distant sécurisé à l'interface SCADA développée avec Node-RED, l'outil de tunneling HTTPS Ngrok a été employé. Cette solution permet d'exposer le serveur SCADA local à travers une URL publique sécurisée, sans nécessiter de modification de la configuration réseau interne de l'environnement industriel. Un tunnel chiffré est établi vers un

port local, tel que le port 1880 (Figure IV.22), offrant aux opérateurs, techniciens et ingénieurs un accès web multi-plateforme (PC, tablette, smartphone) au tableau de bord SCADA. L'intégration avec un système d'authentification basé sur les rôles, combinée au chiffrement des échanges via le protocole TLS, assure un haut niveau de confidentialité, de traçabilité et de contrôle des accès.

```
ngrok http http://localhost:8080
```

Figure IV.22 : Commande d'accès à l'interface à distance via Ngrok

IV.3.10 Architecture du Système

Dans le cadre de la mise en œuvre de la solution, une architecture modulaire et évolutive a été définie afin d'assurer la connexion entre les différentes parties (Figure IV.23). Cette organisation vise à répondre aux exigences de performance, de maintenabilité et de communication en temps réel.Pour garantir une interaction fluide et bidirectionnelle entre les composants, une API WebSocket a été intégrée. Elle permet une transmission continue des données sans surcharge réseau, favorisant ainsi une supervision instantanée et réactive du système.

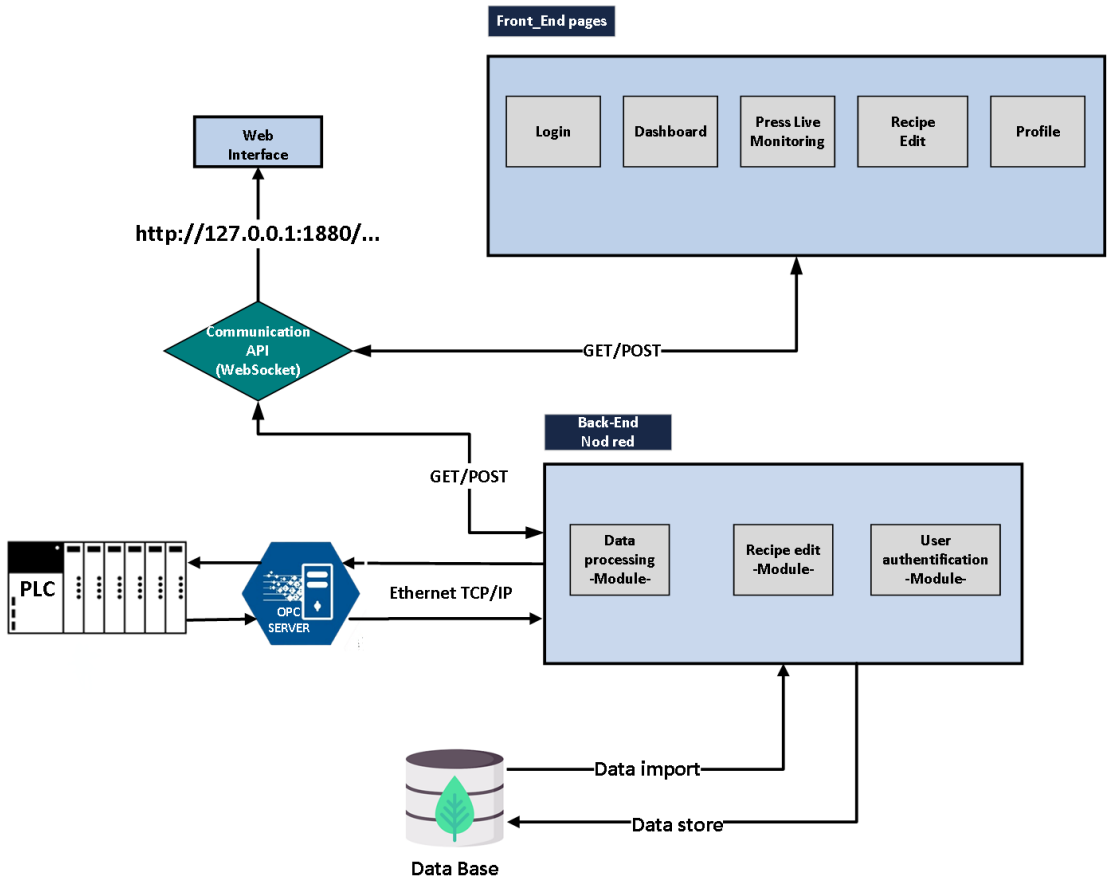


Figure IV.23 : Schéma global de l'architecture du système SCADA

IV.3.11 Interfaces du Système SCADA Développé

IV.3.11.1 Interface de Connexion (Login)

L'accès au système est sécurisé par une interface d'authentification (figure IV.24) via nom d'utilisateur et mot de passe. Chaque utilisateur dispose d'un accès personnalisé selon son rôle, assurant un contrôle strict et une protection des opérations supervisées.

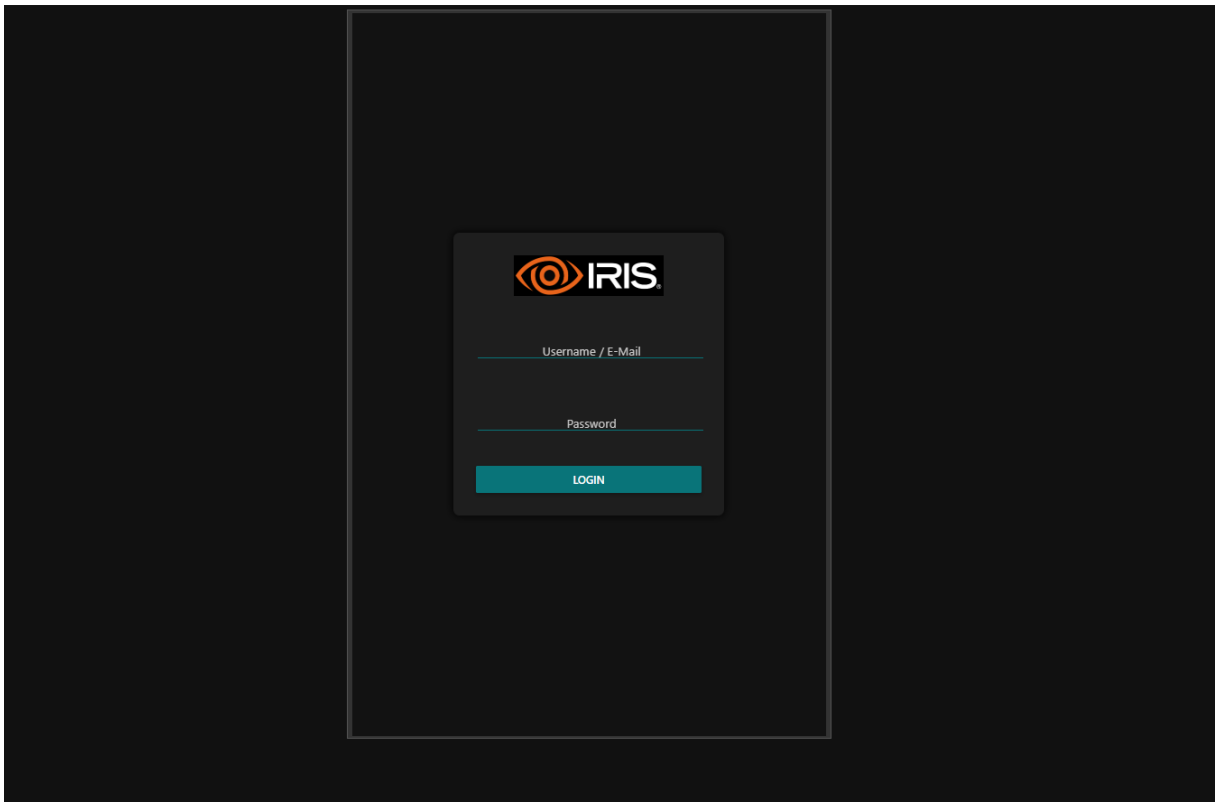


Figure IV.24 : Vue de l'Interface de Connexion (Login)

IV.3.11.2 Tableau de Bord (Dashboard)

Le tableau de bord (Figure IV.25) offre une vue centralisée et en temps réel des machines de pressage. Il affiche les principaux paramètres opérationnels, notamment la température, la pression et la force mesurées, et permet une supervision efficace du processus industriel. Il présente également l'état opérationnel des machines, les alarmes actives récentes ainsi que le suivi de la production par équipe.

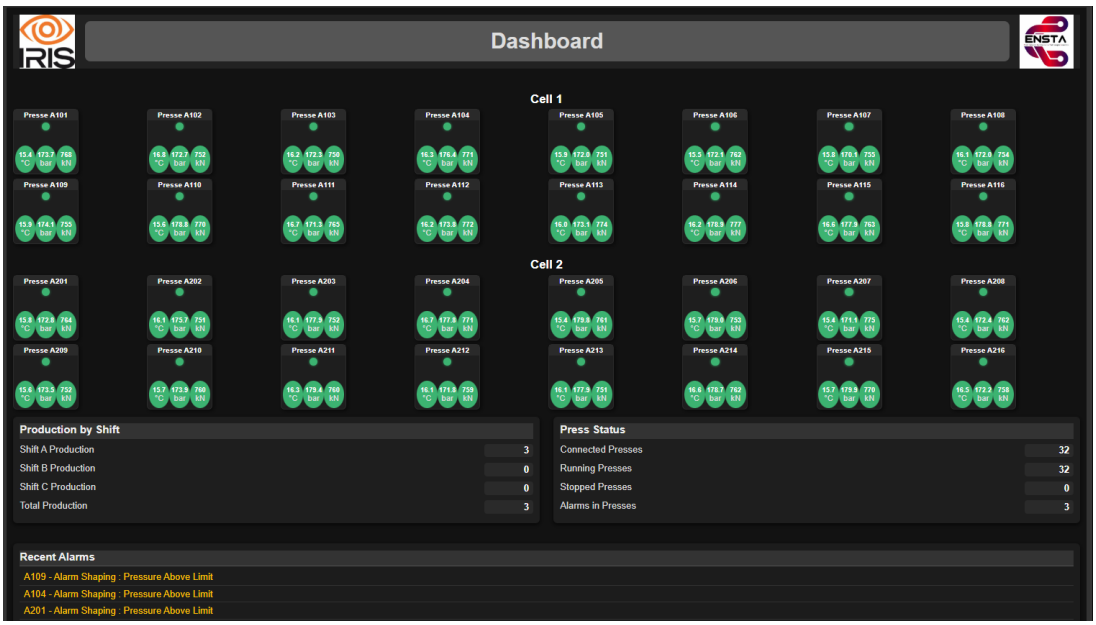


Figure IV.25 : Vue de tableau de Bord (Dashboard)

IV.3.11.3 Données en Temps Réel (Real-Time Data)

Cette interface (figure IV.26), propre à chaque presse, permet de visualiser en temps réel les principaux paramètres de fonctionnement, tels que la pression, la température et la force, via des jauges dynamiques. Elle intègre également un graphique temporel retraçant l'évolution

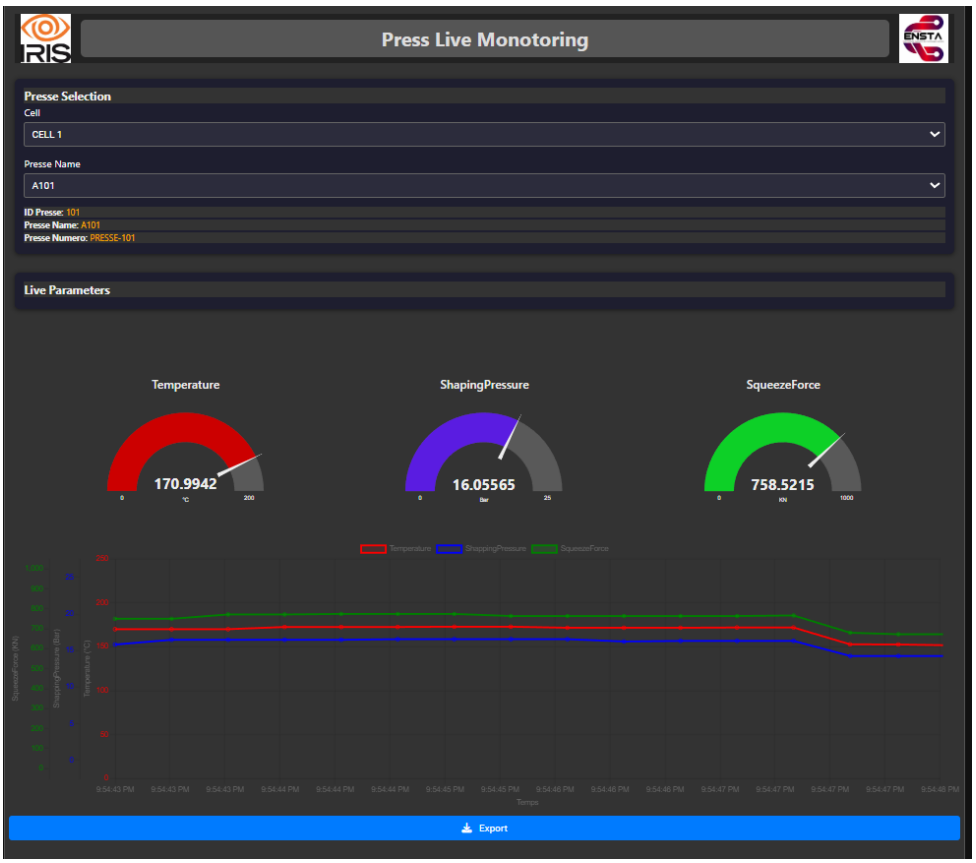


Figure IV.26 : Vue de l'interface d'affichage des données (Press Live Monotoring)

La figure IV.27 illustre l'affichage en temps réel des données de température enregistrées dans MongoDB, associées à une presse spécifique (ID Presse : 101), permettant de suivre précisément l'évolution thermique du système.



Figure IV.27 : Données de température enregistrées dans MongoDB

IV.3.11.4 Configuration de Recette (Edit Recipe)

L'espace de configuration (figure IV.28) permet de sélectionner la recette du pneu attribuée à la presse visée. La validation de ce choix s'effectue via le bouton Confirm



Figure IV.28 : Vue de Configuration de Recette (Recipe Edit)

La figure IV.29 présente les données de fabrication stockées dans la collection Tires Recipe de la base MongoDB. Chaque recette correspond à un type et une taille de pneu, avec les paramètres associés tels que la pression de formage, la force de serrage, la température et le temps de cuisson. Ces informations permettent de définir précisément les conditions optimales de production pour chaque modèle.

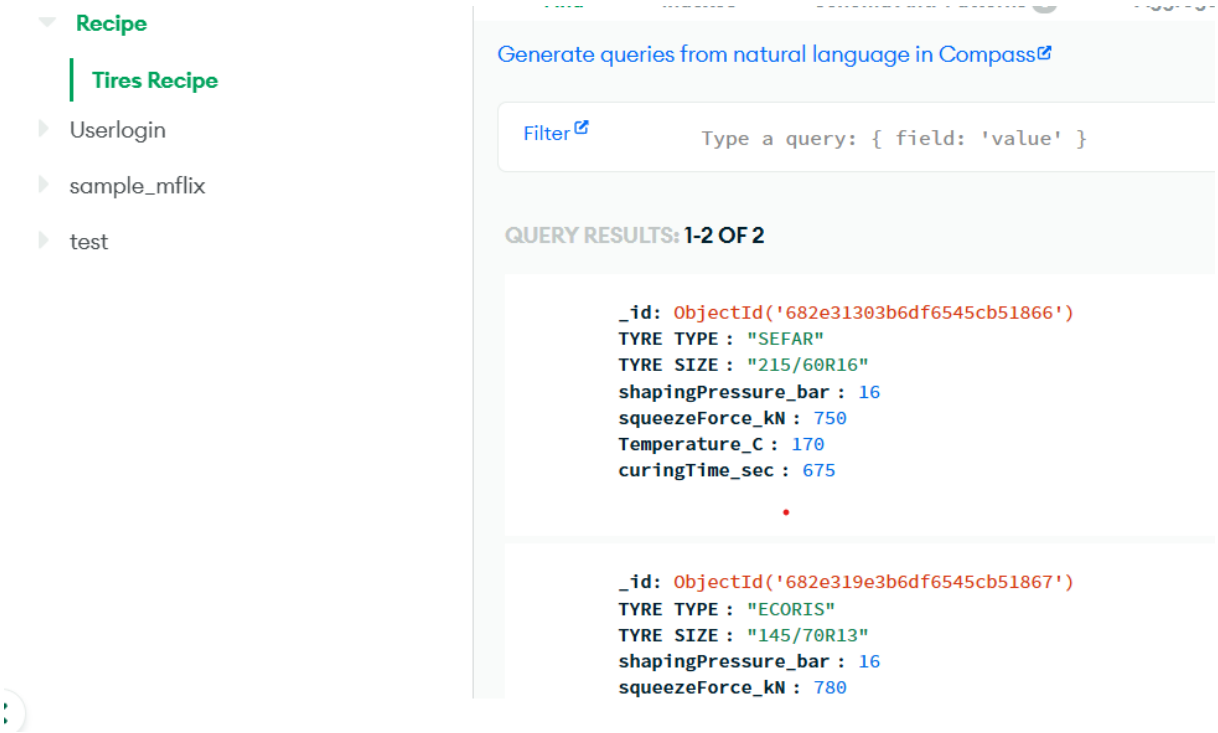


Figure IV.29 : Vue de Recettes de fabrication des pneus dans MongoDB

IV.3.11.5 Paramètres du Profil

L'espace profil (figure IV.30) permet à l'utilisateur d'accéder à ses informations personnelles, de mettre à jour son mot de passe, de signaler un problème technique et de consulter les messages système reçus.

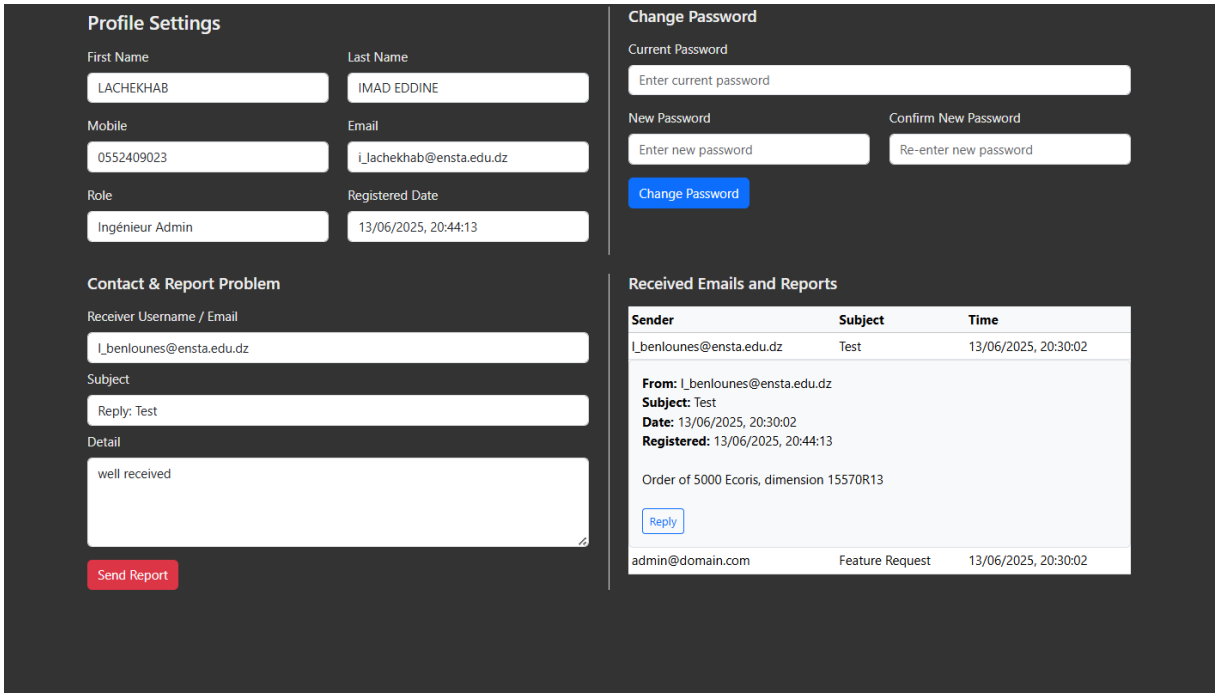


Figure IV.30 : Vue de Paramètres du Profil

IV.3.11.6 Implémentation de l'IHM et de l'interface SCADA

L'implémentation de l'IHM et de l'interface SCADA (figure IV.31) a été réalisée sur un automate Siemens S7-1500 disponible dans le laboratoire de l'école. Cette étape a permis de vérifier le bon fonctionnement de l'interface homme-machine (IHM) développée.



Figure IV.31 : Implémentation de l'IHM et de l'interface SCADA

IV.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter en détail les deux principales plateformes de supervision développées dans le cadre de ce projet : l'interface HMI locale sous TIA Portal et le système SCADA distant basé sur Node-RED et MongoDB. Ces solutions répondent aux besoins spécifiques de l'usine IRIS Tyres en assurant un pilotage efficace, une surveillance en temps réel et une gestion sécurisée des paramètres critiques du processus de vulcanisation. Nous avons mis en évidence leurs fonctionnalités, leur architecture ainsi que les avantages qu'elles offrent en termes de réactivité, d'accessibilité et de performance. Les tests réalisés ont confirmé leur fiabilité, leur compatibilité avec les exigences industrielles, ainsi que leur capacité à améliorer la traçabilité, la sécurité et la continuité de production.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans un contexte industriel réel, marqué par les exigences croissantes en matière de performance, de qualité et de traçabilité des processus, dans une dynamique d'évolution vers l'industrie 4.0. Il a porté sur la modernisation complète d'une presse de vulcanisation utilisée dans la fabrication des pneumatiques au sein de l'entreprise IRIS Tyres.

À travers une analyse approfondie du procédé existant, nous avons mis en évidence des limitations majeures touchant la stabilité de la pression de formage, la régulation manuelle de la force de serrage et la rigidité de la supervision. Pour y remédier, une solution intégrée a été conçue, alliant automatisation, régulation intelligente et supervision moderne.

Sur le plan technique, le projet a permis la mise en œuvre d'un régulateur PID flou adaptatif, capable d'ajuster dynamiquement les paramètres de commande en fonction des variations du procédé. Ce choix a été motivé par les limites observées du PID classique face aux dynamiques instables de la pression. Par ailleurs, un système de supervision performant, basé sur une interface IHM locale (TP900 Comfort) et un SCADA web multiplateforme utilisant Node-RED et MongoDB, a été développé pour assurer une visualisation en temps réel, une gestion sécurisée et une accessibilité à distance.

Ce projet a mobilisé des compétences transversales en automatisme, régulation, programmation d'automates Siemens (S7-1500), communication industrielle (OPC UA), conception d'interfaces, structuration logicielle, et exploitation de données industrielles. Il a aussi exigé une capacité d'analyse critique, de structuration méthodologique et d'adaptation aux contraintes du terrain.

Les résultats obtenus démontrent une amélioration significative de la stabilité du procédé, une meilleure réactivité des interfaces opérateur, et une plus grande souplesse de supervision. Toutefois, certaines pistes restent ouvertes pour des évolutions futures : renforcement de la cybersécurité des échanges, intégration de diagnostics intelligents, déploiement sur cloud industriel ou encore application de modèles prédictifs basés sur les données.

En conclusion, ce travail nous a permis de confronter nos compétences d'ingénieur à une problématique industrielle concrète, de développer des solutions innovantes et cohérentes, et d'approfondir notre savoir-faire technique tout en nous formant à une démarche rigoureuse, collaborative et orientée résultats. Il constitue une étape marquante dans notre parcours d'ingénieur et ouvre la voie à de futures contributions dans le domaine de l'automatisation industrielle intelligente.

Bibliographie

[1] Iris Tyres. (2025) Site officiel et chaîne youtube officielle d'iris algérie. Sources : site officiel de l'entreprise et chaîne YouTube officielle.

[2] Usine IRIS Tyres, "Document interne de l'usine (non publié)," 2025, document interne.

[3] Entreprise IRIS Tyres, "Photo prise dans l'entreprise," 2025, source interne.

[4] Instrumentys. (2021) Qu'est-ce qu'un capteur de pression ? définition. https://instrumentys.com/2021/02/18/quest-ce-quun-capteur-de-pression-definition/.

[5] CITEC. (2025) Site officiel. https://www.citec.fr/.

[6] Fortop. (2025) Encodeurs linéaires. https://shop.fortop.be/fr/i/encodeurs-lineaires.html.

[7] SICK. (2025) Site officiel. https://www.sick.com/.

[8] Ponar SA. (2025) Soupape proportionnelle – directindustry. https://www.directindustry.fr/prod/ponar-sa/product-40845-444953.html.

[9] Siemens. (2025) Moteur simotics s-1fk2 – siemens mall. https://mall.industry.siemens.com/mall/fr/WW/Catalog/Products/8210250.

[10] Ouest Hydraulique. (2025) Site officiel (en). https://www.ouest-hydraulique.fr/en/.

[11] Sopra Pneumatic. (2025) Site officiel. https://sopra-pneumatic.com/.

[12] Mouvex – PSG Dover. (2025) Pompes à palettes (vane pumps). https://www.psgdover.com/fr/mouvex/products/vane-pumps.

[13] Seatec. (2021) Pompes à engrenages : principe et fonctionnement. https://www.seatec.fr/blog/2021/08/03/pompes-a-engrenages-principe-et-fonctionnement.

[14] A. Louchene. (2025) Automates programmables industriels. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/louchene_ahmed/files/automates_programmables_industriels.pdf (consulté le 2 juin 2025).

[15] S. AG. (2025) Simatic s7-1500 – manuel du cpu 1515-2 pn. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/211/109972211/att_1289314/v1/s71500_cpu1515_2_pn_manual_fr-FR_fr-FR.pdf (consulté le 2 juin 2025).

[16] Siemens AG, *SIMATIC HMI Comfort Panels – Manuel matériel*, 2025, disponible en ligne : https://cache.industry.siemens.com/dl/files/233/49313233/att_904648/v1/HWComfortPanelsfrFR_fr-FR.pdf (consulté le 16 juin 2025).

[17] Université de Lorraine – IUT de Saint-Dié-des-Vosges. (2025) Capteurs. http://dptgeii.iutsd.univ-lorraine.fr/cours/lpsarii/IM/Cours/Capteurs.pdf.

[18] GATT. (2025) Cours instrumentation – pression. https://www.gatt.fr/CIRA/Cours/Instrum/CIRA1%20-%203)%20Pression.pdf.

[19] Suco-VSE France. (2025) Qu'est-ce qu'un pressostat ? (définition). https://eshop.sucovse.fr/blog/detail/pressostat-definition.html.

[20] CITEC. (2025) Généralités sur les sondes pt100. https://www.citec.fr/cbx/_ftp/610-01gnralitssondespt100.pdf.

[21] My Car Dictionary. (2025) Thermostat. https://www.my-cardictionary.com/heatingair-conditioning/thermostat.pdf.

[22] Faulhaber. (2025) Technical information – encoders. https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/FR_TI_ENCODERS.pdf.

[23] Zettlex UK Ltd. (2025) Principe de fonctionnement des capteurs inductifs. https://www.celeramotion.com/inductive-sensors/wp-content/uploads/sites/7/2019/05/Zettlex_Principe-de-fonctionnement-des-capteurs-inductifs_rev2.0_FR-2.pdf.

[24] Datasensing. (2025) Principes de base du fonctionnement des capteurs photoélectriques. https://www.audin.fr/pdf/documentations/datasensing/capteurs-photoelectriques/principe.pdf.

[25] Technologue Pro. (2025) Les préactionneurs électriques. https://www.technologuepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch31-les-preactionneurs-electriques.pdf.

[26] Meguellati Mohamed. (2025) Actionneurs – chapitre iv. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/meguellati-mohamed/files/actionneurs.pdf.

[27] Senga. (2025) Vannes de régulation proportionnelle. https://www.senga.fr/images/pdf/vannes-regulation-proportionnelles-senga.pdf.

[28] S. Bellalah, M. Chouchene, and H. Hamdi. (2018) Introduction à l'hydraulique. https://fac.umc.edu.dz/st/actionneurs_chap9_intro_hydraul.pdf.

[29] A. Lakehal. (2023) État de l'art sur les machines électriques et les systèmes de commande. http://dspace.ensta.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/208/1/MFE.2023.TE.LAKEHAL.pdf.

[30] S. AG. (2025) S7-1500 – configuration et contrôle modulaires, version v3.1. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/270/29430270/att_967135/v1/29430270_Config-Control-Modular_DOC_V31_en.pdf (consulté le 2 juin 2025).

[31] ——. (2022) Opc ua methods for the simatic s7-1500 opc ua server, entry id : 109756885, v1.2. https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109756885/109756885_OpcUa_ServerMethods_DOC_V1_2_en.pdf (consulté le 28 mai 2025).

[32] Siemens AG, *S7-1500 / ET200MP Automation System In a Nutshell*, 2021, https://cache.industry.siemens.com/dl/files/357/109481357/att_863662/v1/S7-1500_in_a_Nutshell.pdf.

[33] PROFIBUS PROFINET International (PI). (2023) Profinet technology and application. version 2.4. https://www.profibus.com.

[34] Siemens AG. (2018) Programming guideline for s7-1200/1500. siemens ag. https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:c7de7888-d24c-4e74-ad41-759e47e4e444/Programovani-S7-1200-1500-2018.pdf.

[35] ——. (2020) Scale_x (scale) and norm_x (normalize). https://support.industry.siemens.com/dokumentation/pdftopicdownload.topicpdf.aspx?docversionid=62121591435&topicid=59852219403&lang=en.

[36] ——, *PID Control with PID_Compact. Version 2.0*, 2020, https://cache.industry.siemens.com/dl/files/401/100746401/att_984768/v1/100746401_S71x00_PidCompact_DOC_V2.0_en.pdf.

[37] National Instruments, *PID Theory Explained. 2023*, 2023, https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html.

[38] N. Cherrat, H. Boubertakh, and H. Arioui. (2018) Adaptive fuzzy pid control for a class of uncertain mimo nonlinear systems with dead-zone inputs' nonlinearities. https://www.academia.edu/107798289/Adaptive_Fuzzy_PID_Control_for_a_Class_of_Uncertain_MIMO_Nonlinear_Systems_with_Dead-zone_Inputs_Nonlinearities.

[39] L. A. Zadeh. (1965) Fuzzy sets. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X.

[40] F. Dernoncourt. (2025) Introduction à la logique floue. https://franck-dernoncourt.developpez.com/tutoriels/algo/introduction-logique-floue/.

[41] A. A. Fahmy and A. M. Abdel Ghany. (2015) Adaptive functional-based neuro-fuzzy-pid incremental controller structure. https://www.researchgate.net/publication/270344175_Adaptive_Functional-Based_Neuro-Fuzzy-PID_Incremental_Controller_Structure.

[42] R. Kumar and A. Sharma. (2020) Scada system and its applications. https://www.allengineeringjournal.com/assets/archives/2020/vol4issue1/4-2-12-547.pdf.

[43] Node-RED. (2025) Flow-based programming for the internet of things. https://nodered.org/about/.

[44] FlowFuse. (2023) How to deploy a basic opc ua server in node-red. https://flowfuse.com/blog/2023/07/how-to-deploy-a-basic-opc-ua-server-in-node-red/.

[45] MongoDB. (2025) Time series data management. https://www.mongodb.com/resources/basics/time-series-data-management.

Annexe A

Composants du système d'automatisation

A.1 Automate S7-1515-2 PN

Le contrôleur S7-1515-2 PN fait partie de la gamme d'automates SIMATIC S7-1500 de Siemens. Il est conçu pour des applications d'automatisation exigeant des performances élevées, une communication rapide et une fiabilité accrue. Ce modèle dispose de deux interfaces PROFINET intégrées, permettant la connexion simultanée à plusieurs équipements. Il intègre également un écran de diagnostic en façade, fournissant des informations sur l'état du système, les messages d'erreur et l'activité du programme, sans nécessiter de connexion à un PC. Le CPU est basé sur une architecture multicœur, ce qui permet un traitement parallèle des tâches, assurant une meilleure réactivité du système. La programmation s'effectue via le logiciel TIA Portal, avec la prise en charge des langages standardisés selon la norme IEC 61131-3 (LAD, FBD, STL, SCL). Il est également doté de fonctions de diagnostic avancées et de sécurité, renforçant la disponibilité du système [15].

A.1.1 Caractéristiques techniques du CPU S7-1515-2 PN

Le CPU S7-1515-2 PN est un module central de traitement destiné à l'exécution des programmes d'automatisation au sein de l'architecture S7-1500. Il se distingue par sa capacité à gérer efficacement des applications industrielles exigeantes grâce à ses ressources matérielles avancées. Le Tableau A.1 ci-dessous présente les principales caractéristiques techniques à connaître sur ce modèle.

Tableau A.1 : Caractéristiques techniques du CPU S7-1515-2 PN [15]

Caractéristique	**Valeur**
Fabricant	Siemens
Référence produit	6ES7 515-2AM01-0AB0
Version du firmware	V2.8 ou supérieur
Logiciel de programmation	TIA Portal (STEP 7)
Langages supportés	LAD, FBD, STL, SCL (IEC 61131-3)
Interfaces de communication	2 ports PROFINET intégrés
Processeur	Multicœur haute performance
Mémoire programme	500 Ko
Mémoire de données	3 Mo
Mémoire de charge	3 Mo
Temps de traitement booléen	30 ns
Écran de diagnostic	Oui, en façade
Horloge temps réel	Intégrée
Tension d'alimentation	24 VDC
Consommation de courant	env. 0.6 A
Indice de protection	IP20
Protection du programme	Oui (contre modification non autorisée)
Température de fonctionnement	0 °C à +60 °C
Dimensions (L × H × P)	130 × 147 × 129 mm
Poids	env. 830 g



Figure A.1 : CPU 1515-2 PN [15]

A.2 Interface Homme-Machine (HMI) TP900 Comfort

L'interface homme-machine TP900 Comfort fait partie de la gamme SIMATIC HMI Comfort Panels de Siemens. Ces terminaux sont conçus pour répondre aux exigences élevées en matière de visualisation dans les environnements industriels. Ils offrent un confort d'utilisation accru grâce à un grand écran tactile, une visualisation performante des processus, et une intégration optimale dans l'environnement de développement TIA Portal. Les Comfort Panels permettent une exploitation rapide et intuitive des installations, tout en garantissant une grande fiabilité et une communication flexible via différents protocoles industriels [16].

A.2.1 Caractéristiques techniques du TP900 Comfort

Le tableau A.2 ci-dessous présente les principales caractéristiques techniques de l'interface homme-machine TP900 Comfort, telles que spécifiées par le fabricant Siemens. Ces données permettent d'évaluer la compatibilité de ce panneau avec les exigences d'un système d'automatisation industriel moderne.

Tableau A.2 : Caractéristiques techniques du SIMATIC HMI TP900 Comfort (réf. 6AV2 124-0JC01-0AX0) [16]

Caractéristique	**Description**
Taille de l'écran	9 pouces (TFT, format large 16:9)
Résolution	800 × 480 pixels (WVGA)
Technologie tactile	Écran analogique-résistif
Nombre de couleurs affichables	16 777 216 (24 bits)
Système d'exploitation	Windows CE 6.0
Mémoire de configuration	12 Mo (Flash + RAM)

Interfaces de communication	PROFINET, MPI/PROFIBUS DP, RS-485/422, USB, carte SD
Alimentation	24 V DC
Indice de protection	IP65 (face avant), IP20 (arrière)
Luminosité	Réglable (dimmable), durée de vie du rétroéclairage ≈ 80 000 h
Configuration logicielle	Compatible avec WinCC Comfort V11 (via TIA Portal)



Figure A.2 : HMI TP900 Comfort [16]

Annexe B

Schémas Électriques, Pneumatiques et Hydrauliques

Cette annexe présente l'ensemble des schémas techniques élaborés dans le cadre du projet d'automatisation du procédé de vulcanisation des pneumatiques. Elle vise à fournir une représentation claire et structurée de l'architecture des systèmes de commande, de puissance, ainsi que des réseaux fluidiques utilisés.

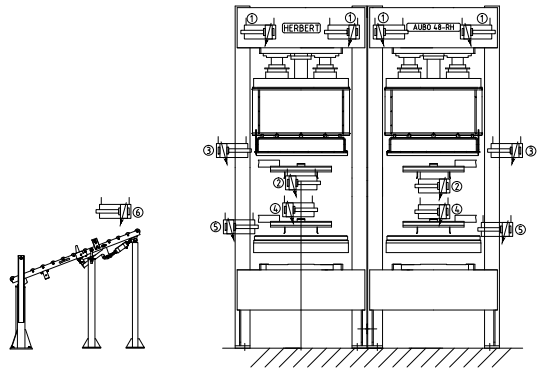
Les schémas joints permettent de visualiser l'organisation fonctionnelle des équipements électriques, pneumatiques et hydrauliques, facilitant ainsi la compréhension globale du système automatisé.

Schémas Pneumatiques

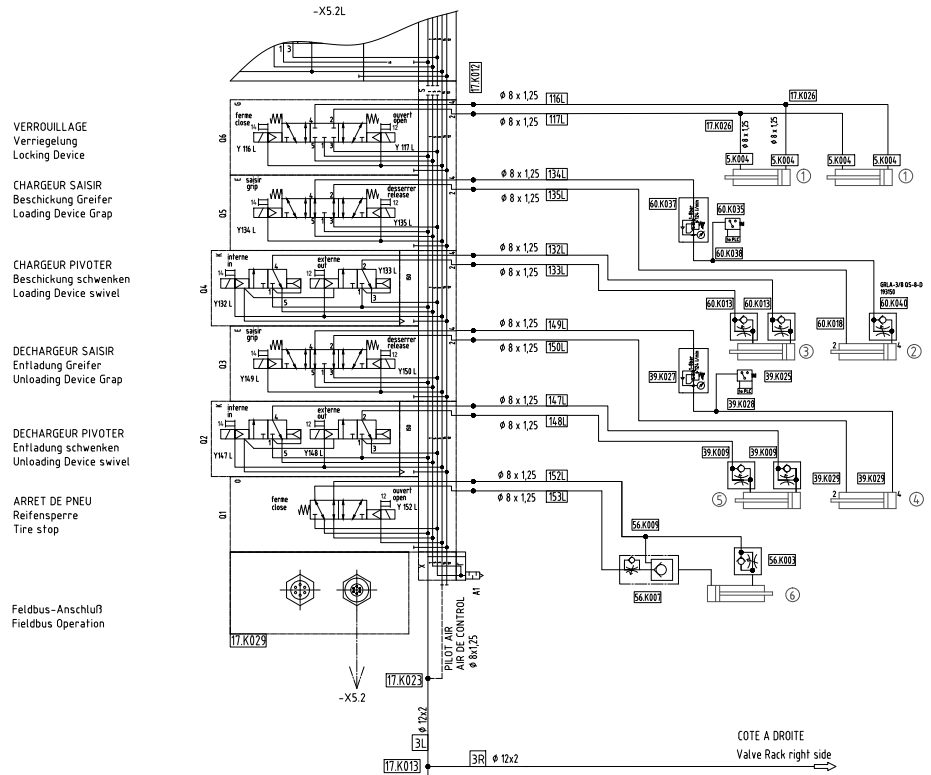
Cette section présente les schémas des circuits pneumatiques utilisés pour la commande des vérins et autres actionneurs. Elle met en lumière l'agencement des composants ainsi que leur contribution au bon déroulement du processus automatisé de vulcanisation.

CYLINDRE
Cylinder

① DSBC-63-200-PPVA-N3 3/8" (VERROUILLAGE / Locking, BG 05; Pos.K005)
② DSBC-63-115-PPVA-N3 3/8" (CHARGEUR SAISIR (Loader gripper, BG 60 ; Pos.K032)
③ DSBC-50-230-PPVA-N3 1/4" (CHARGEUR PIVOTER / Loader swing., BG 60 ; Pos.K039)
④ DSBC-63- 115-PPVA-N3 3/8" (DECHARGEUR SAISIR / Unloader gripper, BG 39 ; Pos.K022)
⑤ DSBC-50-230-PPVA-N3 1/4" (DECHARGEUR PIVOTER / Unloader swing.,BG 39 ; Pos.K038)
⑥ DSBC-40-40-PPVA-N3 1/4" (ARRET DE PNEU / Tire stop.,BG 56 ; Pos.K003)



COTE DE GAUCHE
LEFT SIDE
LINKE SEITE



Die Wartungskombination ist an ein Druckluftnetz nach heutigen Stand der Technik (ISO 8573-1) vorgesehen.
Wir setzen ungeölte, restölfreie (Restöl von Kompressoren max. 0,1mg/m³ für "HEES-Flüssigkeiten, Bioöle" bzw. max 5mg/m³ für "Mineralöle" zulässig) und entsprechend getrocknete Druckluft (ISO 8573-1, Klasse 4 mit 3° C DTP) voraus.
Unsere Empfehlung, der Drucktaupunkt (DTP) sollte mindestens 10°C unter der Umgebungstemperatur sein !

The maintenance combination is intended for compressed air mains according to today`s technical standards (ISO 8573-1).
A requirement is unoiled, residual oil free (residual oil of compressors max. 0,1 mg/m³ for "HEES fluids, biological oils" respectively max. 5mg/m³ admissible for mineral oils) and the according dried compressed air (ISO 8573-1, class 4 with 3°C DTP).

We reserve all rights for these documents. These documents may not be copied nor made available to a third person, nor be utilized in any other way without prior approval by us.Any contraventions will cause an obligation to compensation and be punished.
Für diese Unterlage behalten wir uns alle Rechte vor. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Unterlage weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht, noch in anderer Weise verwertet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zur Schadenersatz und sind strafbar.

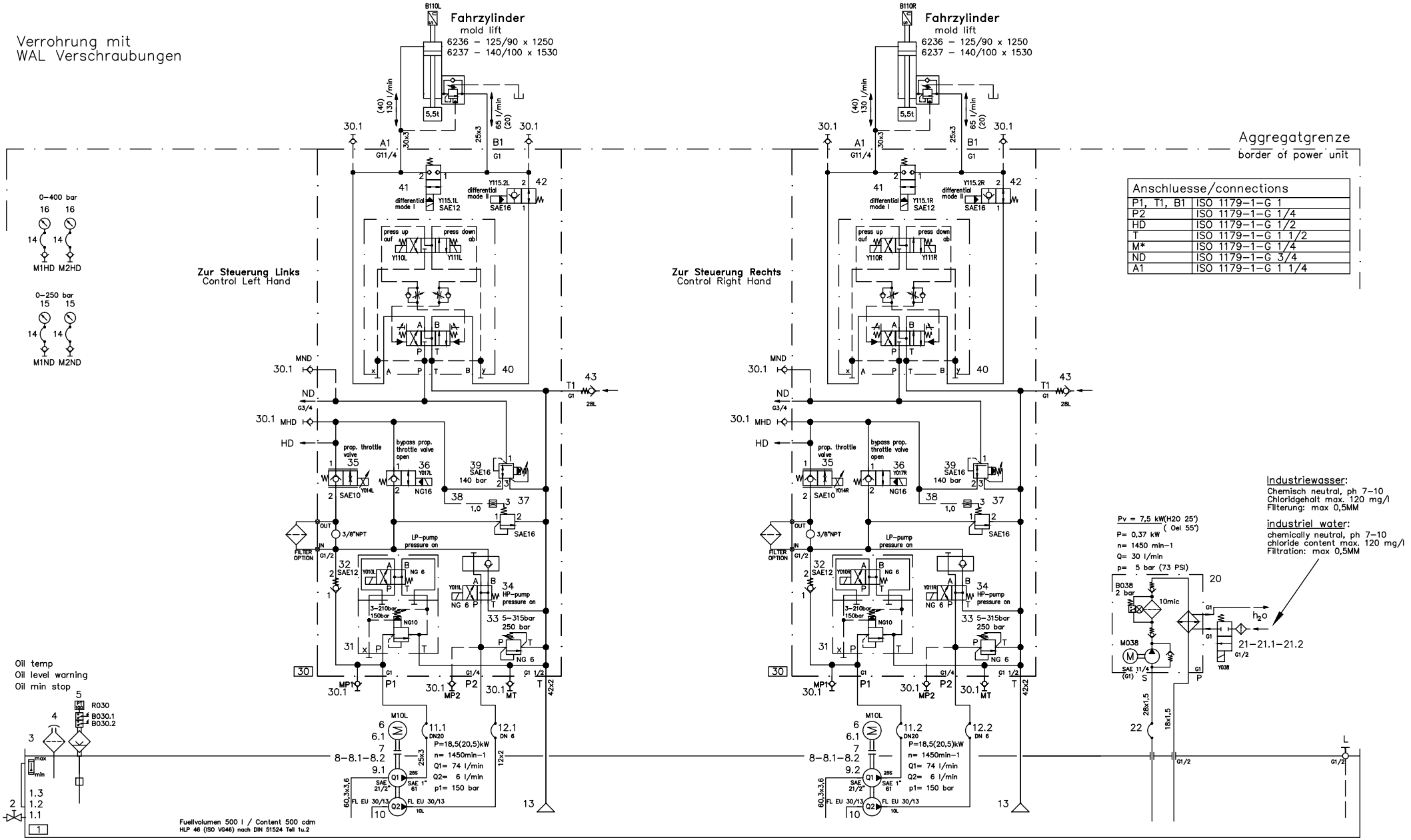
Auftragsnummer:	6236-16-K
Without modification this drawing is identical to:	
Allg.- Toleranzen Freimaßtoleranzen nach DIN 7168 ~~fein~~ mittel ~~grob~~	
Oberfläche DIN 3141 Reihe 2	
Maßstab	1:3
Masse (Gew.)	
Maschinentyp	AUBO 48-RH
Werkstoff	
Bearb.	10.02.2017 TBe
Gepr.	
Norm	
Bennenung	Pneumatikplan Pneumatic Plan
HERBERT Maschinen und Anlagenbau GmbH & Co. KG Industriestraße 10 36088 Hünfeld	
Zeichnungsnummer	6236-072-0000
Blatt	- Bl

Zust.	Änderung	Datum	Name
A	Plan überarbeitet	23.03.2017	GH
	EDV Nr.		

Schémas Hydrauliques

Cette section présente les circuits hydrauliques utilisés dans la presse de vulcanisation. Ils illustrent la circulation du fluide sous pression, assurant des fonctions essentielles telles que le verrouillage, le serrage, ainsi que le déplacement des éléments mécaniques.

Verrohrung mit
WAL Verschraubungen



Anschluesse/connections	
P1, T1, B1	ISO 1179–1–G 1
P2	ISO 1179–1–G 1/4
HD	ISO 1179–1–G 1/2
T	ISO 1179–1–G 1 1/2
M*	ISO 1179–1–G 1/4
ND	ISO 1179–1–G 3/4
A1	ISO 1179–1–G 1 1/4

REVISIONE / revision	DATA / date	NOME / nome
D		
C		
B		
A		

	DATA / date	NOME / name
DISEGN. drawn	24/01/17	S. TACCA
CONTR. checked	24/01/17	G. LA PORTA
APPR. appr.	24/01/17	A. HEYER

Copyright EATON Fluid Power S.r.l.

EATON
Fluid Power S.r.l.
Via Matteotti, 8
20060–Pessano con Bornago
(Milano)

CLIENTE
Customer
HERBERT

NOME SISTEMA
System name
–

MODELLO
Model
–

DESCRIZIONE
title
Z063415–PU
HYDRAULIC POWER UNIT FOR AUBO 48/52–RH
6236/37–079–0000

NUMERO DISEGNO CIRCUITO
Circuit drw. no. XIM–4369.00_06

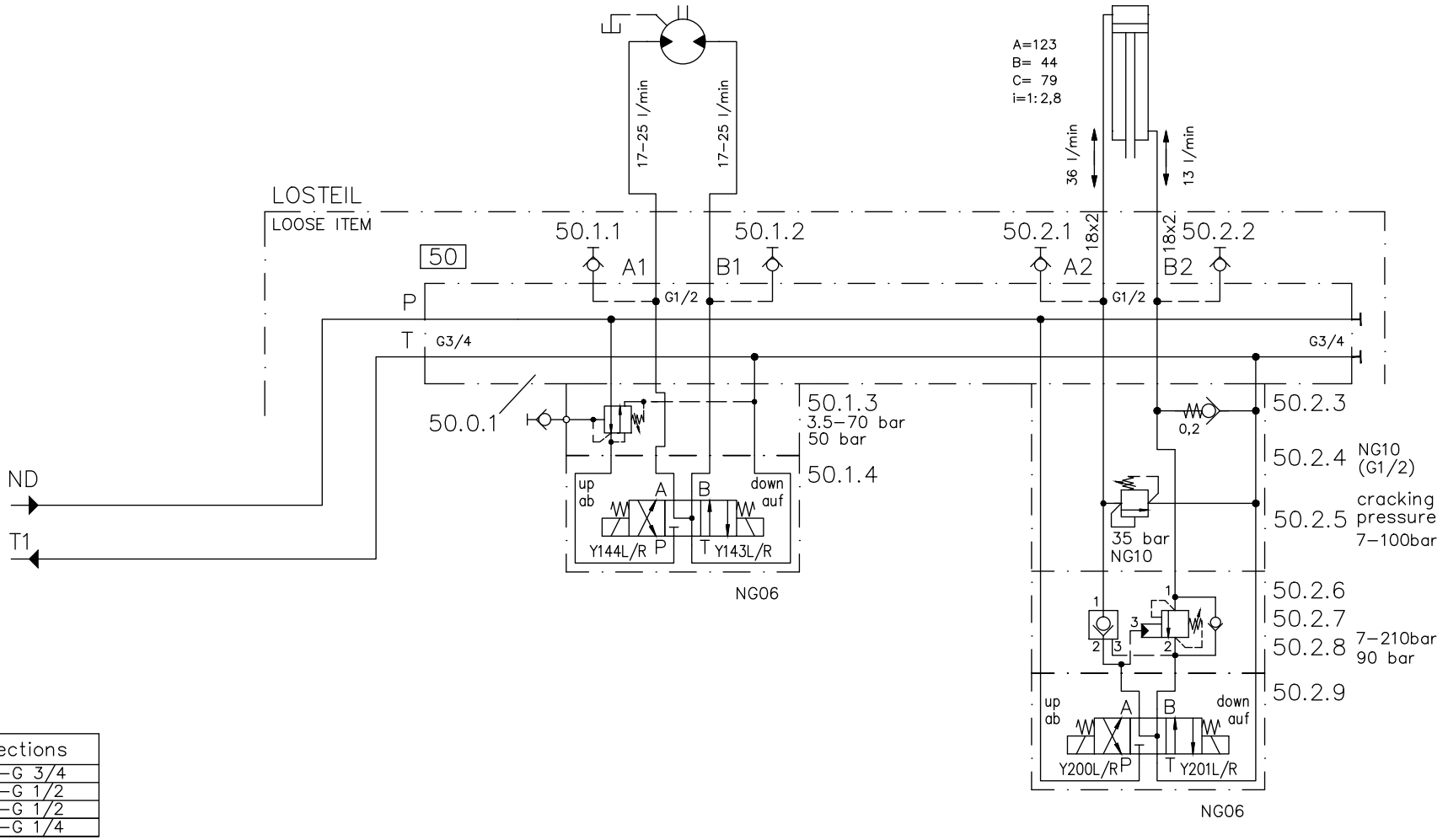
PAGINA sheet 1 DI of 1

Hauptfunktionen
1x Steuerung Links "L"
1x Steuerung Rechts "R"

Main functions
1 off – Left Hand
1 off – Right Hand

50.1
Formverstellung
mold adjustment
250 ccm, 140bar
**min–1
***Nm

50.2
Radialformzylinder
segmented mold
6236 – 125/100 x 260
6237 – 125/100 x 300
t= 5 sec
v = 50 mm/s



Anschluesse/connections	
ND, T1	ISO 1179–1–G 3/4
A2, B2	ISO 1179–1–G 1/2
A3, B3	ISO 1179–1–G 1/2
M*	ISO 1179–1–G 1/4

D					DATA / date	NOME / name
C				DISEGN. drawn	22/02/17	S. TACCA
B				CONTR. checked	22/02/17	G. LA PORTA
A				APPR. appr.	22/02/17	A. HEYER
	REVISIONE / revision	DATA / date	NOME / nome	Copyright EATON Fluid Power S.r.l.		

EATON
Fluid Power S.r.l.
Via Matteotti, 8
20060–Pessano con Bornago
(Milano)

CLIENTE Customer	HERBERT
NOME SISTEMA System name	–
MODELLO Model	–
DESCRIZIONE title	Z005316–CVB MAIN FUNCTION MANIFOLD AUBO 48/52–RH 6236/37–079–0000
NUMERO DISEGNO CIRCUITO Circuit drw. no.	XIM–4370.00_01
PAGINA sheet / DI of	1 / 1

Nebenfunktionen
1xSteuerung Links "L"

auxiliary functions
1 off – Left Hand

60L.5 Beschickung
loader
6236–50/36 x 1540
6237–50/36 x 1800
t = 6 sec
v = 250 mm/s
A= 19,6
B= 9,4
C= 10,2
i=1:2
B130L
30 l/min
14 l/min

60L.4 Entladung
unloader
50/36 x 510
t = 2 sec
v = 250 mm/s
A= 19,6
B= 9,4
C= 10,2
i=1:2
B145L
30 l/min
14 l/min

60L.3 Ausstosser
lower bead ring
2x 35/25 x 160
t = 2 sec
v = 80 mm/s
A= 19,2
B= 9,4
C= 9,8
i=1:2
9 l/min
4.5 l/min
B181L 60bar
DA2

60L.2 Balg klemmen
bladder clamp
2x 55/30 x 75
t = 1,8 sec
v = 40 mm/s
A= 47,5
B= 33,4
C= 14,1
i=1:1,42
8 l/min
8 l/min
B163L 60bar
DA2

60L.1 Balg Strecken
top ring
75/50 x 350
t = 4,5 sec
v = 80 mm/s
A= 19,6
B= 13,4
C= 6,2
i=1:1,46
9.4 l/min
6.4 l/min
B165L

LOSTEIL
LOOSE ITEM
60L

60L.5.1 A7L
60L.5.2 B7L
60L.4.1 A6L
60L.4.2 B6L
60L.3.1 A5L
60L.3.2 B5L
60L.2.1 A4L
60L.2.2 B4L
60L.1.1 A3L
60L.1.2 B3L
G3/8
G1/2
P
T
60L.0.1

up auf / down ab
Y130L / Y131L
60L.5.3
60L.5.4 (*)
60L.5.5
NG06

(*): Counterbalance valve
(pilot ratio: 4:1)

Adjustment:
screw cw to release load
screw ccw to increase load

cracking pressure 70–210 bar
__ bar

up auf / down ab
Y145L / Y146L
60L.4.3
60L.4.4 (*)
60L.4.5
NG06

(*): Counterbalance valve
(pilot ratio: 4:1)

Adjustment:
screw cw to release load
screw ccw to increase load

cracking pressure 70–210 bar
__ bar

1,0
down ab / up auf
Y181L / Y180L
60L.3.3
60L.3.4
NG06

1,0
clamp ab / release auf
Y163L / Y162L
60L.2.3
60L.2.4
NG06

2
1
NG 8
1,0
down ab / up auf
Y166L / Y165L
60L.1.3
60L.1.4
60L.1.5
60L.1.6
NG06

Counterbalance valve
7–100 bar

(squeeze)
Schliesskr.
ND
T1

Anschluesse/connections	
ND, T1	ISO 1179–1–G 1/2
A, B	ISO 1179–1–G 3/8
M*	ISO 1179–1–G 1/4

					DATA / date	NOME / name
D						
C				DISEGN. drawn	23/02/17	S. TACCA
B				CONTR. checked	23/02/17	G. LA PORTA
A				APPR. appr.	23/02/17	A. HEYER
	REVISIONE / revision	DATA / date	NOME / nome	Copyright EATON Fluid Power S.r.l.		

EATON
Fluid Power S.r.l.
Via Matteotti, 8
20060–Pessano con Bornago
(Milano)

CLIENTE Customer: HERBERT
NOME SISTEMA System name: –
MODELLO Model: –

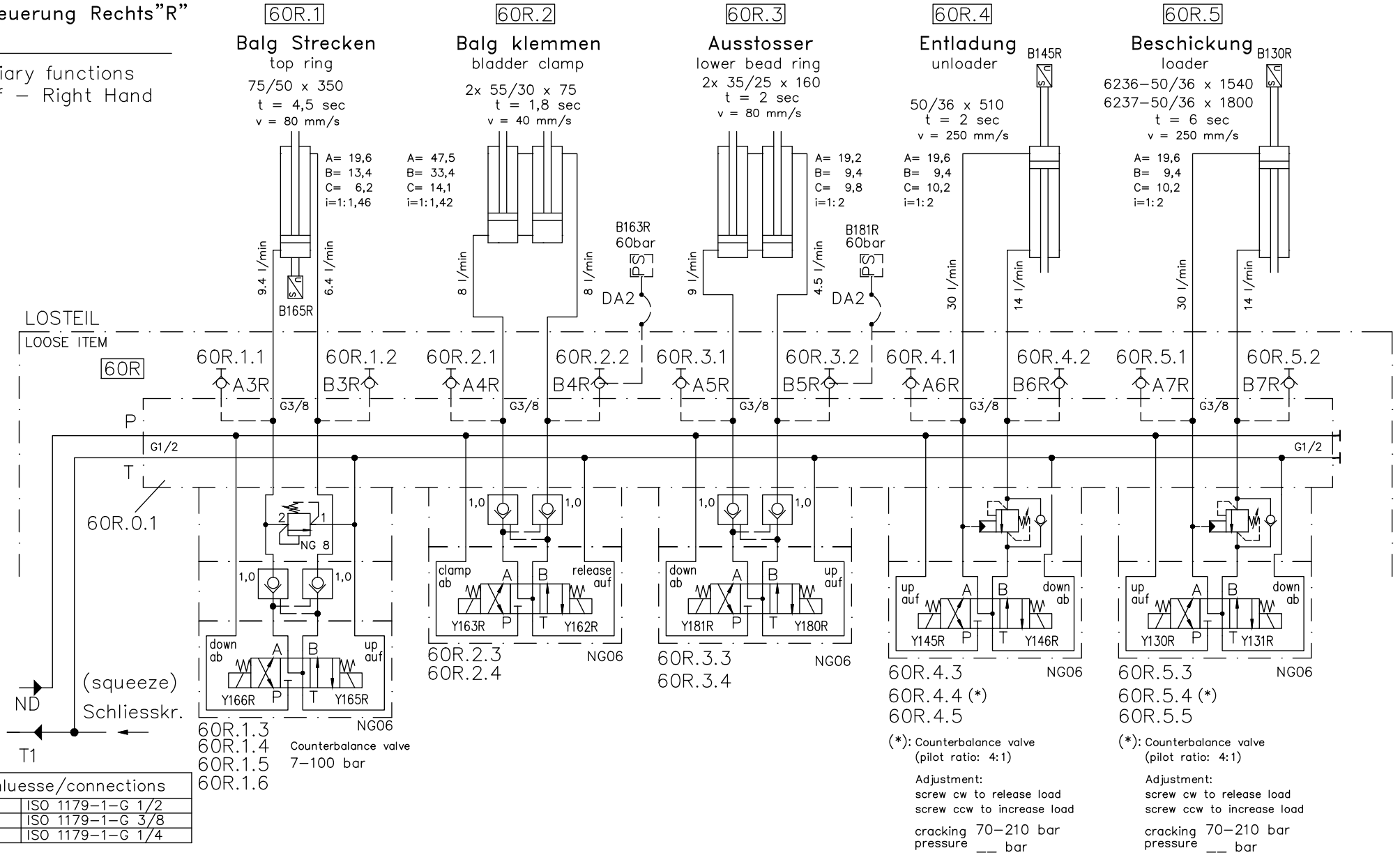
DESCRIZIONE title: Z005317–CVB
AUX. FUN. LEFT MANIFOLD FOR AUBO 48/52–RH
6236/37–079–0000

NUMERO DISEGNO CIRCUITO Circuit drw. no.: XIM–4371.00_06

PAGINA sheet: 1 DI of: 1

Nebenfunktionen
1xSteuerung Rechts"R"

auxiliary functions
1 off – Right Hand



Anschluesse/connections	
ND, T1	ISO 1179–1–G 1/2
A, B	ISO 1179–1–G 3/8
M*	ISO 1179–1–G 1/4

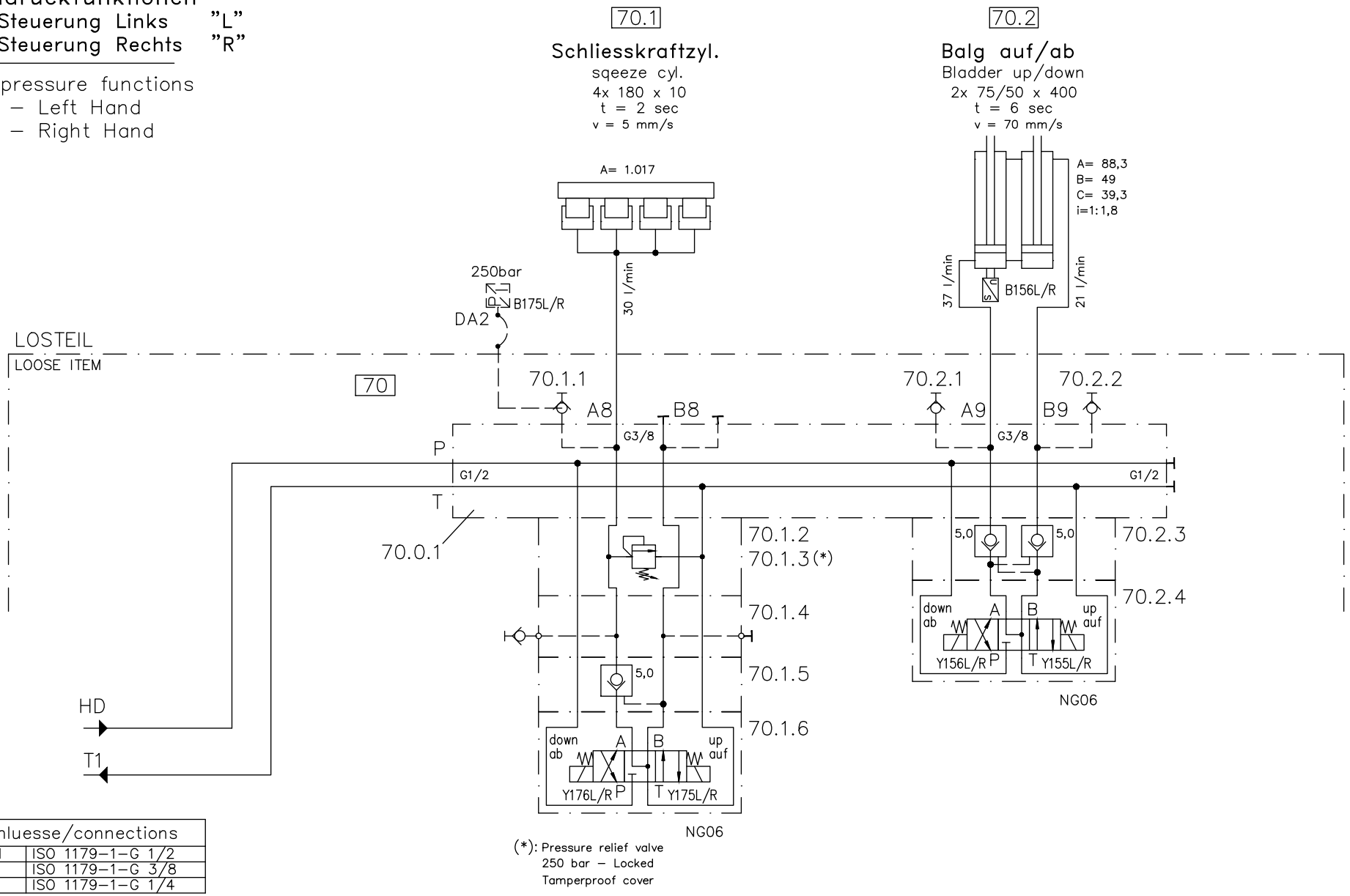
D					DATA / date	NOME / name
C				DISEGN. drawn	23/02/17	S. TACCA
B				CONTR. checked	23/02/17	G. LA PORTA
A				APPR. appr.	23/02/17	A. HEYER
	REVISIONE / revision	DATA / date	NOME / nome	Copyright EATON Fluid Power S.r.l.		

EATON
Fluid Power S.r.l.
Via Matteotti, 8
20060–Pessano con Bornago
(Milano)

CLIENTE Customer	HERBERT
NOME SISTEMA System name	–
MODELLO Model	–
DESCRIZIONE title	Z005318–CVB AUX. FUN. RIGHT MANIFOLD FOR AUBO 48/52–RH 6236/37–079–0000
NUMERO DISEGNO CIRCUITO Circuit drw. no.	XIM–4372.00_06
PAGINA sheet / DI of	1 / 1

Hochdruckfunktionen
1x Steuerung Links "L"
1x Steuerung Rechts "R"

high pressure functions
1 off – Left Hand
1 off – Right Hand



Anschluesse/connections	
HD, T1	ISO 1179–1–G 1/2
A, B	ISO 1179–1–G 3/8
M*	ISO 1179–1–G 1/4

D					DATA / date	NOME / name
C				DISEGN. drawn	22/02/17	S. TACCA
B				CONTR. checked	22/02/17	G. LA PORTA
A				APPR. appr.	22/02/17	A. HEYER
	REVISIONE / revision	DATA / date	NOME / nome	Copyright EATON Fluid Power S.r.l.		

EATON
Fluid Power S.r.l.
Via Matteotti, 8
20060–Pessano con Bornago
(Milano)

CLIENTE Customer	HERBERT
NOME SISTEMA System name	–
MODELLO Model	–
DESCRIZIONE title	Z005319–CVB
	HIGH PR. FUN. MANIFOLD FOR AUBO 48/52–RH
	6236/37–079–0000
NUMERO DISEGNO CIRCUITO Circuit drw. no.	XIM–4373.00_01
PAGINA sheet	1
DI of	1

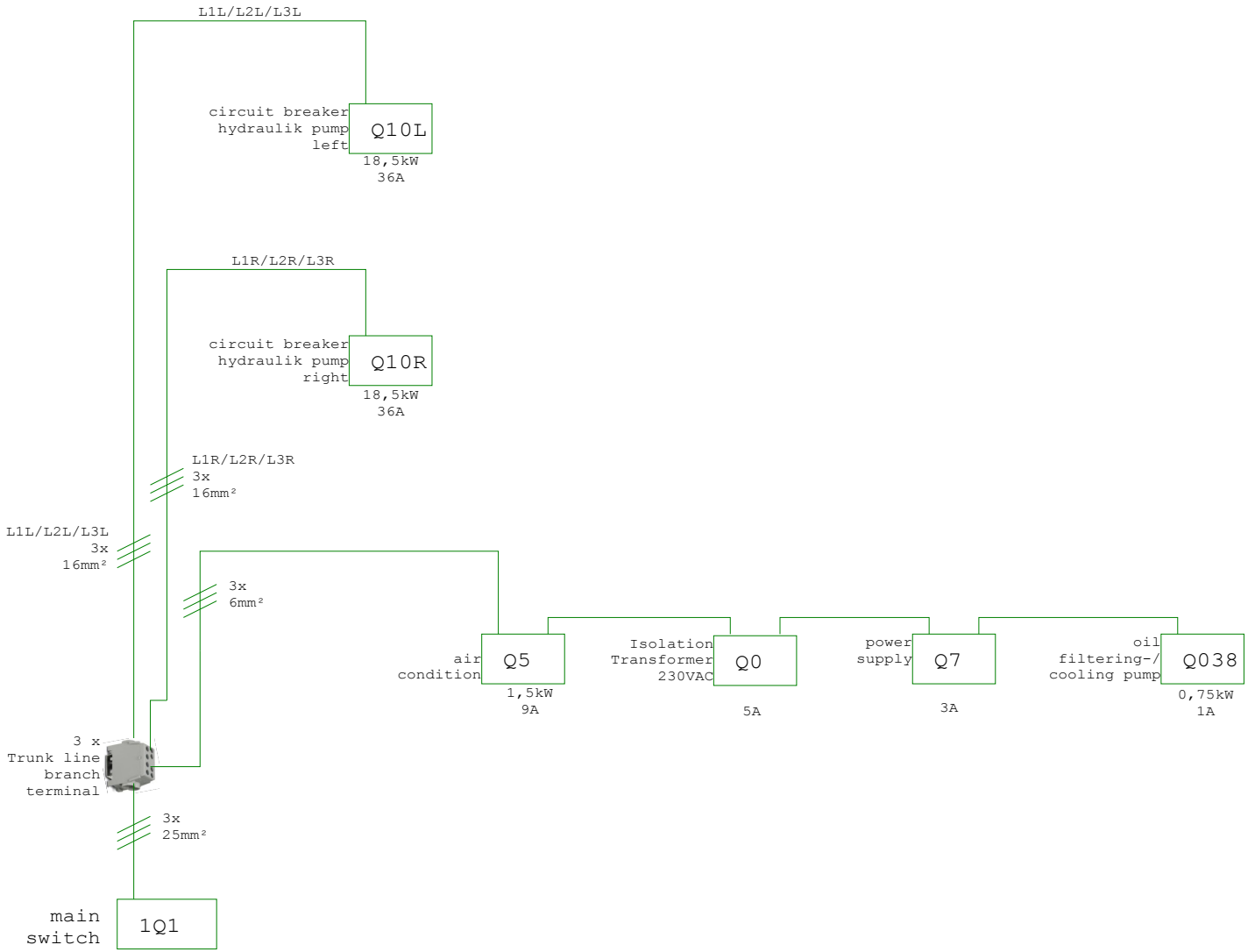
Schémas Électriques

Cette section regroupe les schémas des circuits de puissance et de commande mis en œuvre dans le système automatisé. Ils offrent une vue d'ensemble de l'architecture électrique ainsi que des connexions assurant le fonctionnement optimal et la sécurité du processus.

Sommaire des schémas électriques

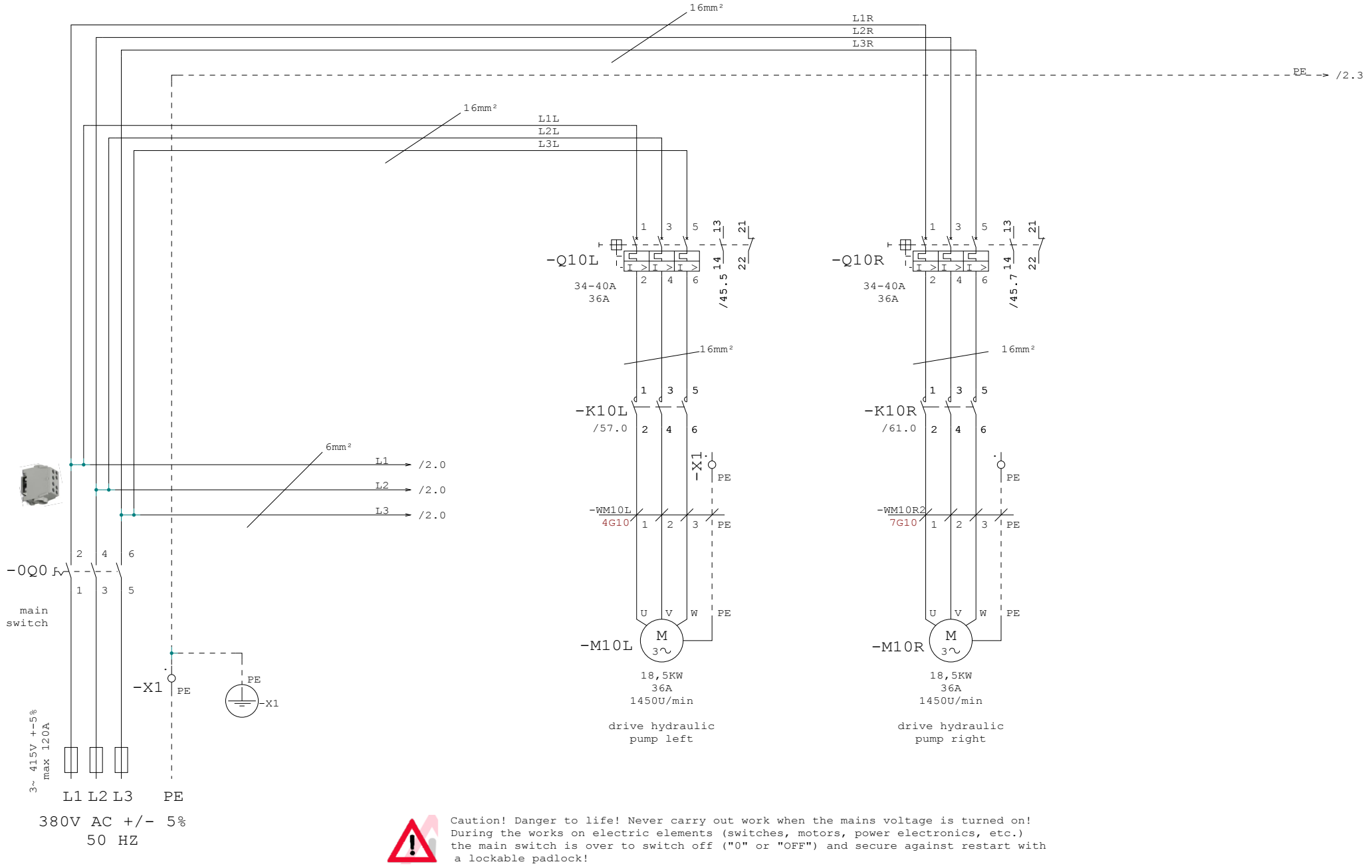
- Schéma E1 : : Structure de distribution de puissance
- Schéma E2 : : Boîtes de distribution actionneurs/capteurs
- Schéma E3 : : Structure de communication ProfiNet/Ethernet
- Schéma E4 : : Commande des mouvements et du chauffage

Structure of electrical power distribution in the control cabinet



name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM Structure of electrical power distribution	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	17.07.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				page 0.c of 71 pages

previous page 0.b
next page 1



Caution! Danger to life! Never carry out work when the mains voltage is turned on!
During the works on electric elements (switches, motors, power electronics, etc.)
the main switch is over to switch off ("0" or "OFF") and secure against restart with
a lockable padlock!

name	Kozakiewicz	05.01.17
	last changed	17.07.17
revision		
	DIN 40719	

HERBERT
Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG
Idustriestrasse 10
36088 Huenfeld - GERMANY

CIRCUIT DIAGRAM

Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH
Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)

Drawing-No.: 6236-090-0000

=
+

page 1
of 71 pages

previous page 0.c
next page 2

Caution! Danger to life! Never carry out work when the mains voltage is turned on!
During the works on electric elements (switches, motors, power electronics, etc.)
the main switch is over to switch off ("0" or "OFF") and secure against restart with
a lockable padlock!

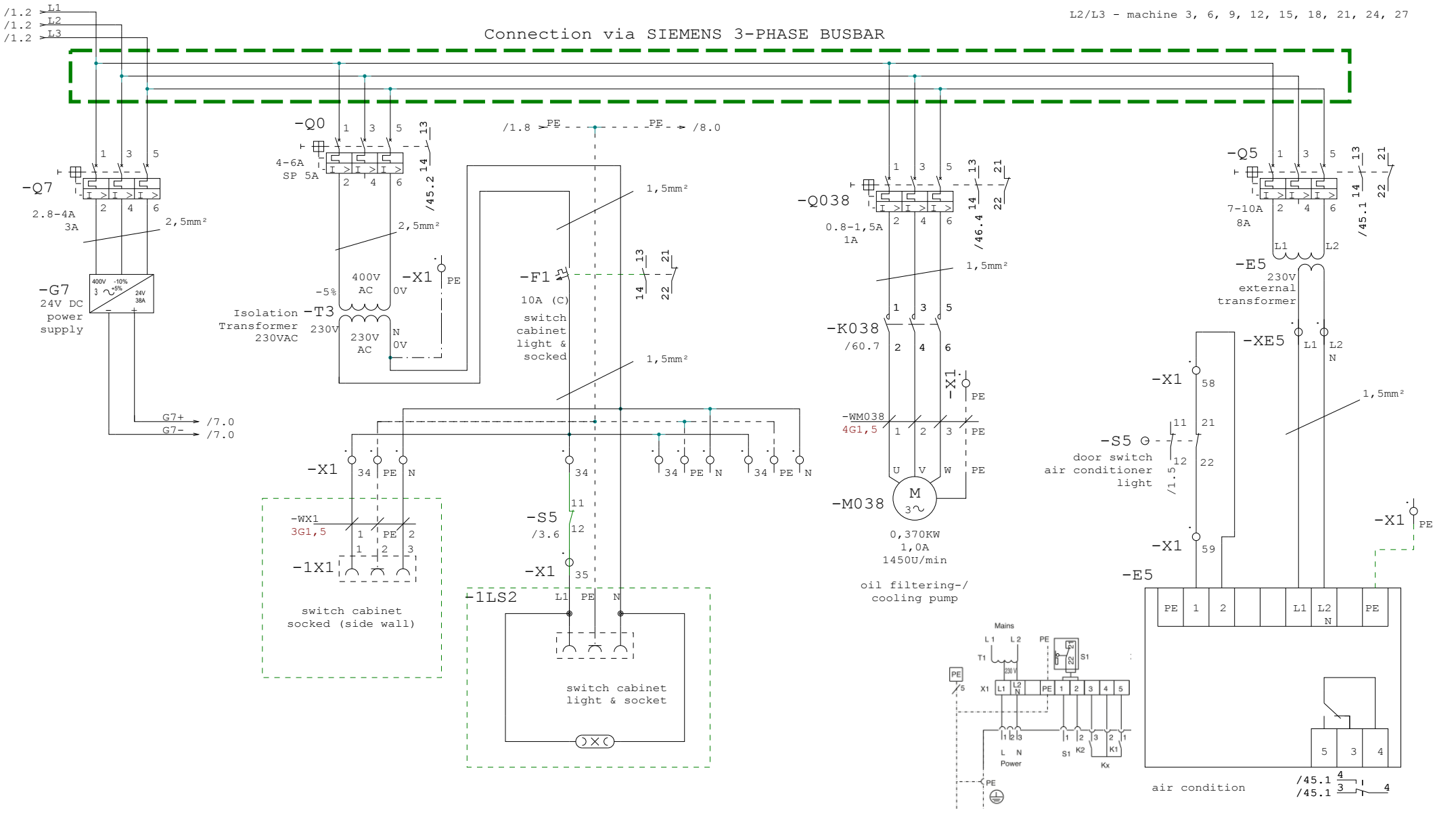
Connection of Q5 - E5
Because of the same phase load.

L1/L2 - machine 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28

L1/L2 - machine 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26

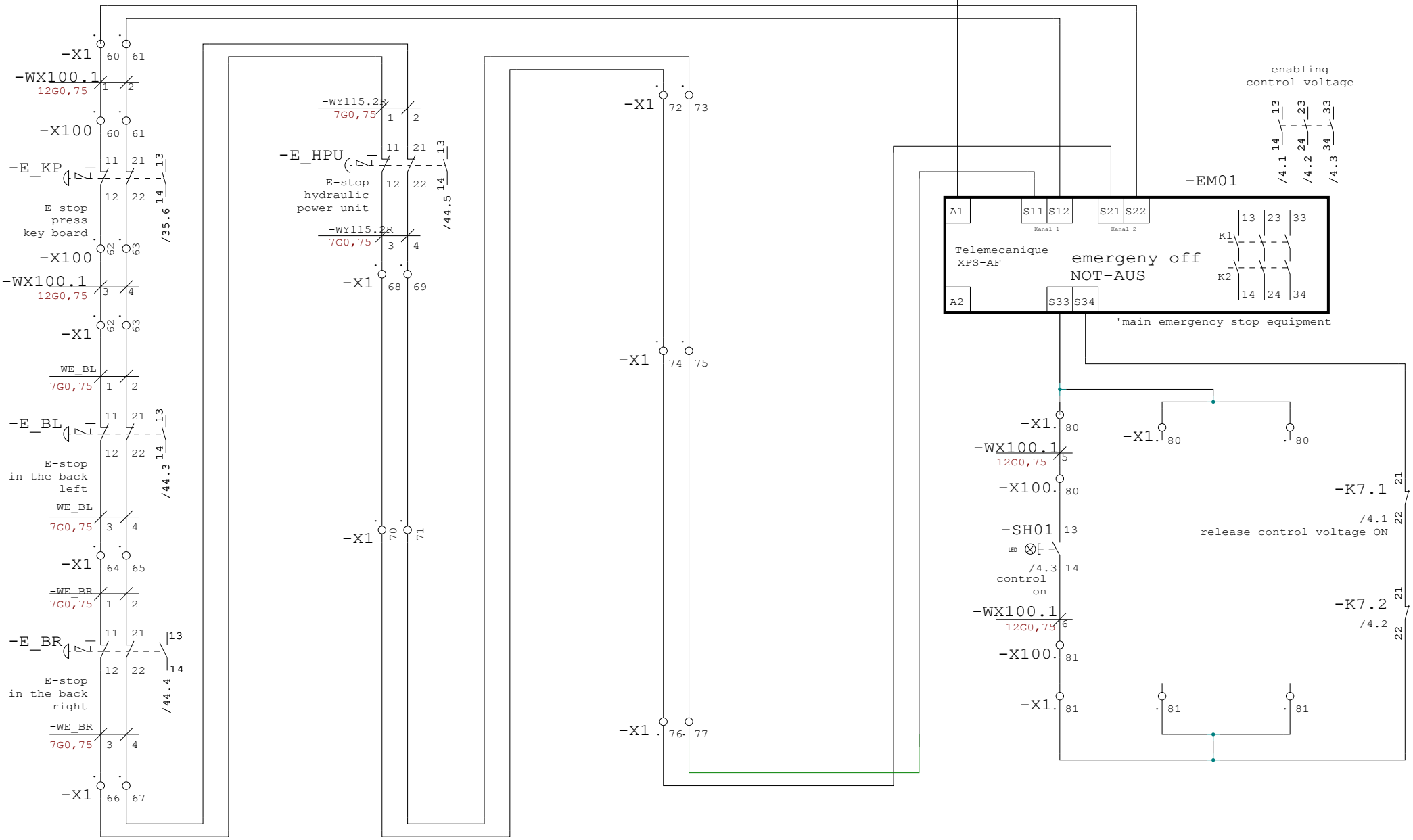
L2/L3 - machine 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27

Connection via SIEMENS 3-PHASE BUSBAR



name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	25.07.17			=
revision					+
	DIN 40719				Drawing-No.: 6236-090-0000 page 2 of 71 pages

previous page 1
next page 3



name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM
	last changed	08.06.17		
revision				
	DIN 40719			

Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH
Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
Drawing-No.: 6236-090-0000
page 3 of 71 pages

previous page 2
next page 4

/3.8 50 ➔ 50 /3.0

-EM01 /3.5
13 14 23 24 33 34

EM01 OK ➔ /44.2

-X1 83

=WX100.1 7
12G0,75

-X100 83

-SH01 X1
+85KB
/3.6
X2

-X100 40

-K7.1 A1 A2

-K7.2 A1 A2

/61.1 40 ➔ 40 /7.0

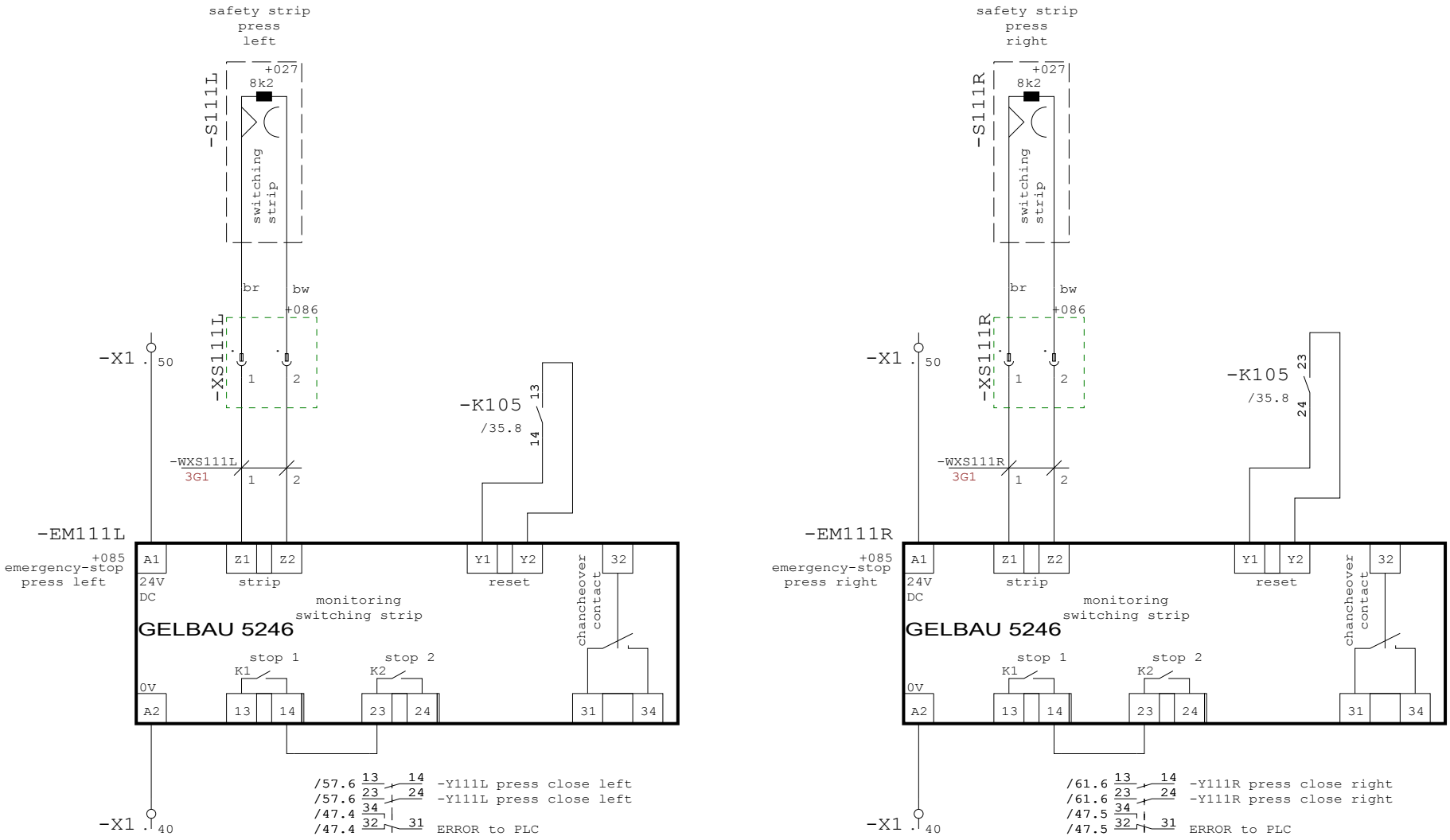
release control voltage ON

control on

/7.1	1 2	/7.1	1 2 enabling output voltage
/7.1	3 4	/7.1	3 4 enabling output voltage
/7.1	5 6	/7.1	5 6 enabling output voltage
/44.1	13 14	/44.1	13 14 control voltege ok (PLC 1 = ok)
/3.8	21 22	/3.8	21 22 reset main monitoring safety relay
	31 32		31 32
/57.0	43 44	/61.0	43 44 enabling drive hydraulic pump

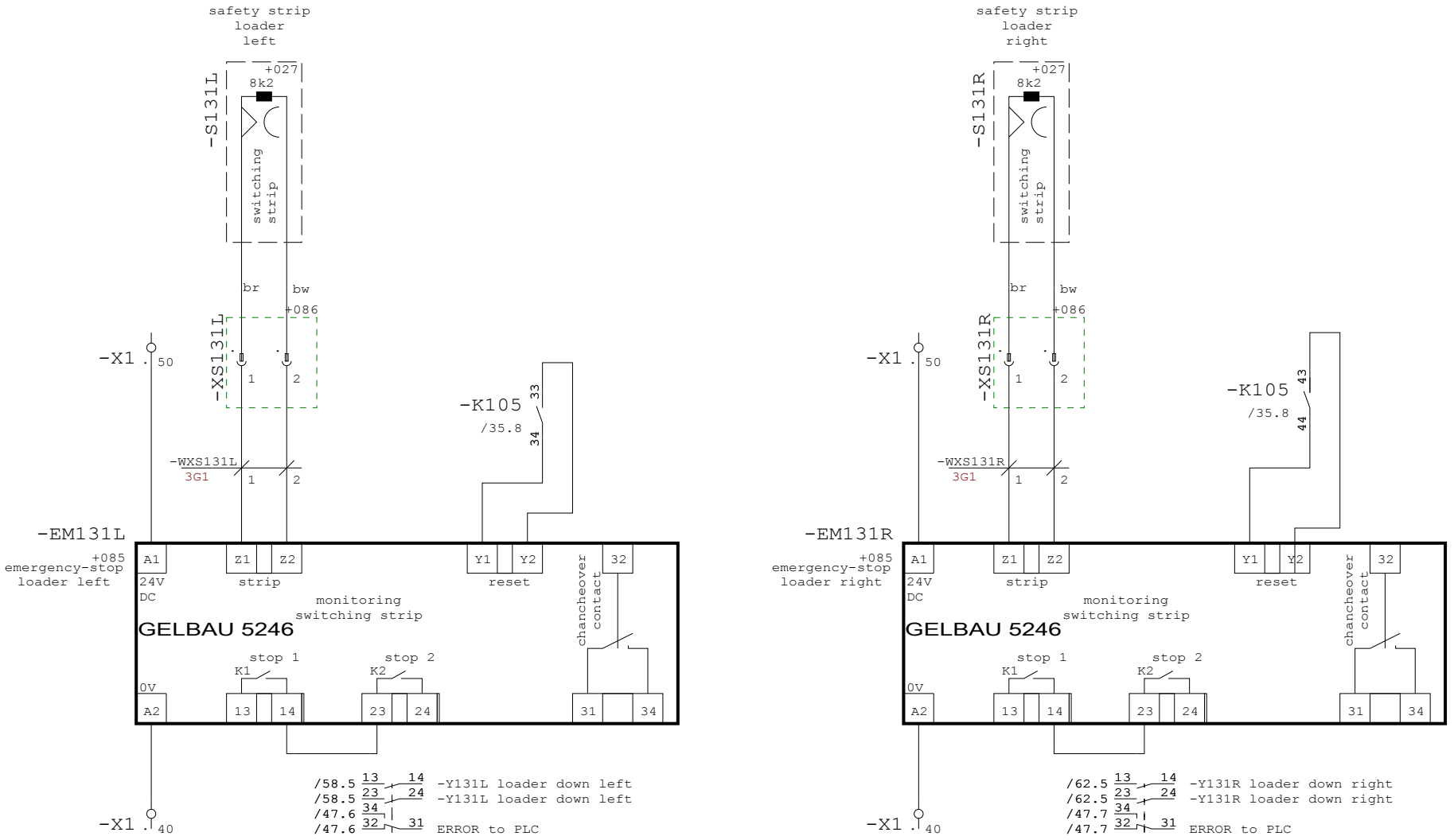
name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM enabling control voltage	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	08.06.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				

=
 +
 page 4
 of 71 pages



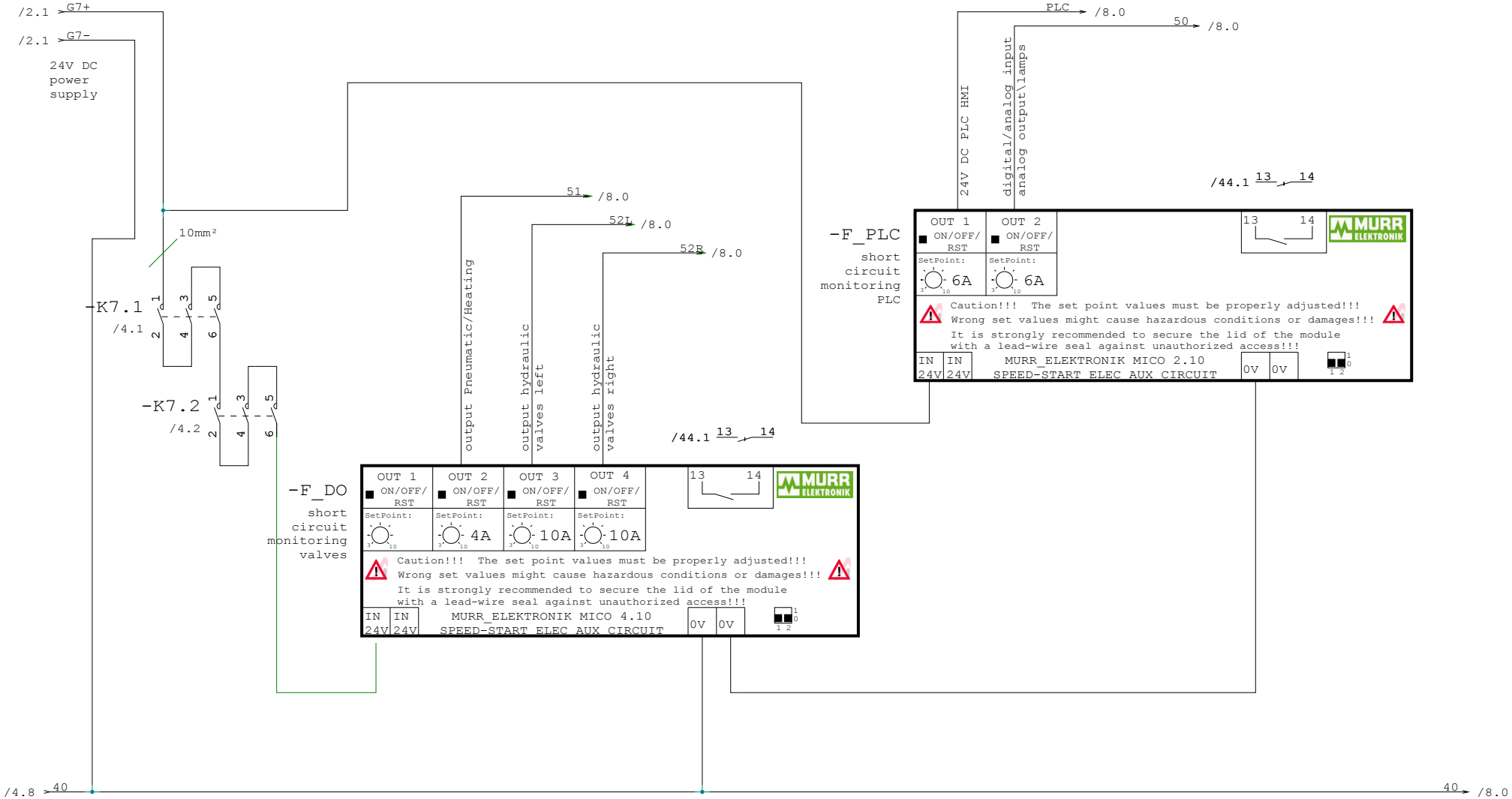
name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	08.06.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				page 5 of 71 pages

previous page 4
next page 6



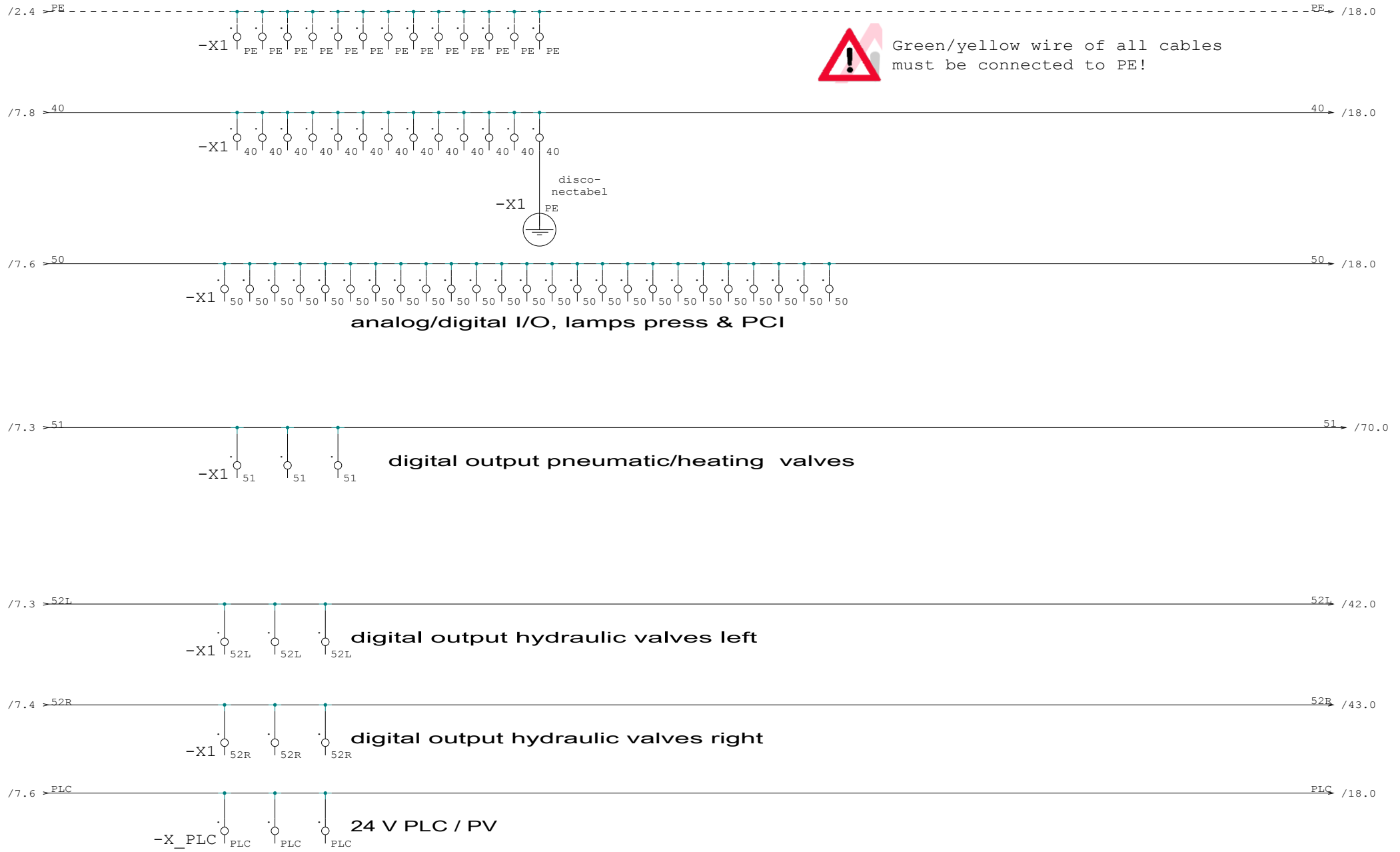
name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	08.06.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				page 6 of 71 pages

previous page 5
next page 7



name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	18.07.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				page 7 of 71 pages

previous page 6
next page 8

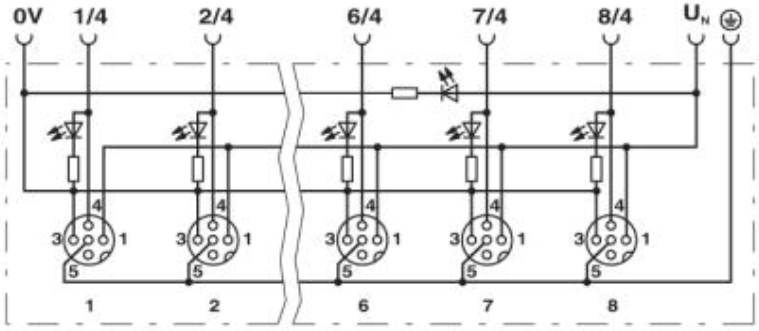


name	Kozakiewicz	05.01.17	**HERBERT**	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH
	last changed	18.07.17	Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG		Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
revision			Idustriestrasse 10		Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719		36088 Huenfeld - GERMANY		page 8 of 71 pages

previous page 7
next page 9

ACTUATOR-/SENSOR DISTRIBUTION BOXES

Pin assignment / wiring diagram



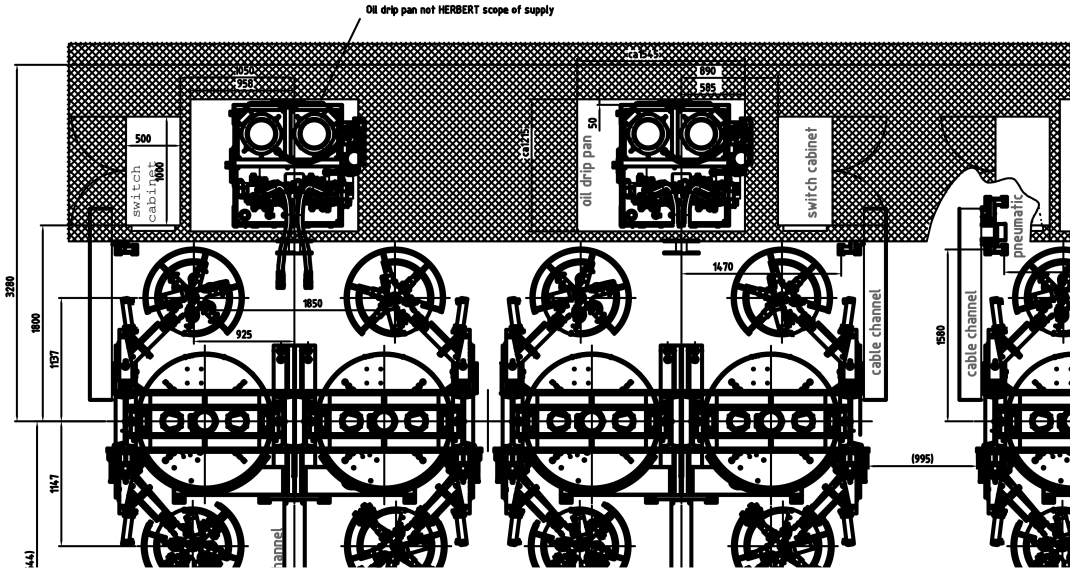
1 -	BN braun	(+ 24VDC)
2 -	not connect	(not connect)
3 -	BU blue	(- 0VDC)
4 -	WH white	(Port 1)
	GN green	(Port 2)
	YE yellow	(Port 3)
	GY grey	(Port 4)
	PK pink	(Port 5)
	RD red	(Port 6)
	BK black	(Port 7)
	VT violet	(Port 8)
5 -	GNYE green/yallow	(PE)

Cable lengths of the PHOENIX boxes

	PRESS A	PRESS B
-TB3L	5m	5m
-TB3R	5m	5m
-TB3.1L	12m	15m
-TB3.1R	15m	12m
-TB3.3L	12m	15m
-TB3.3R	15m	12m
-TB11L	10m	15m
-TB11R	15m	10m
-TB15L	10m	15m
-TB15R	15m	10m
-TB16L	10m	15m
-TB16R	15m	10m
-TB18L	15m	15m
-TB18R	15m	15m
-TB19L	10m	15m
-TB19R	15m	10m

Adjust the lengths during assembly!!!

Top-View Layout



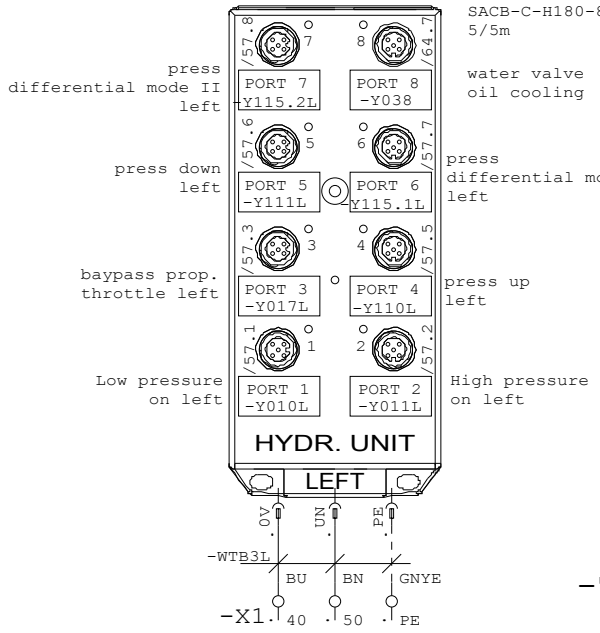
PRESS A PRESS B

name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH
	last changed	12.06.17	Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG		Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
revision			Idustriestrasse 10		Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719		36088 Huenfeld - GERMANY		page 10 of 71 pages

previous page 9 next page 11

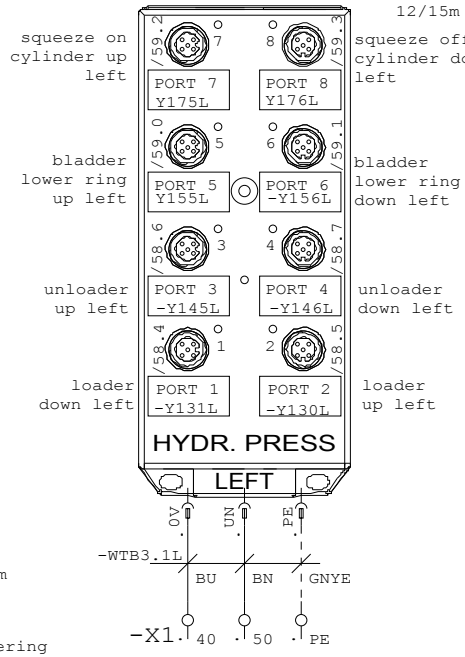
-TB3L

PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8
5/5m



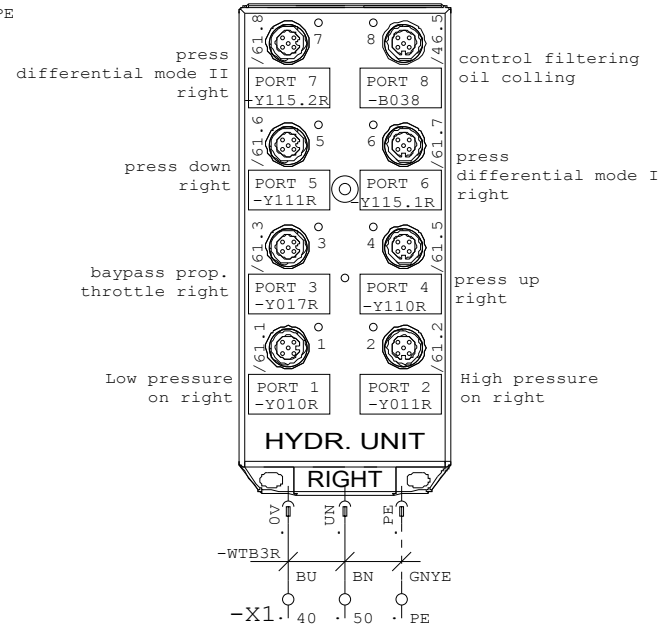
-TB3.1L

PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8
12/15m



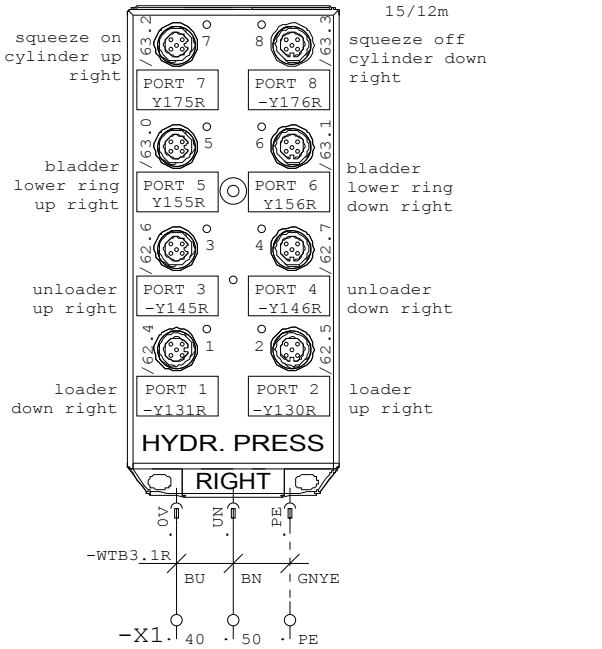
-TB3R

PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8-5/5m



-TB3.1R

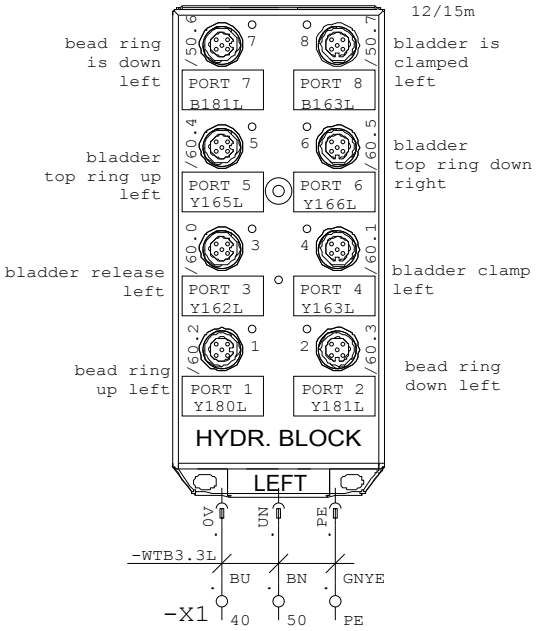
PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/8
15/12m



name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	06.06.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				page 11 of 71 pages

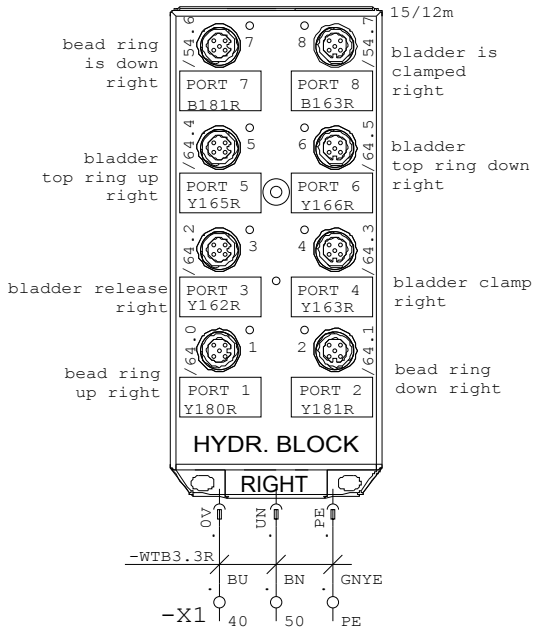
-TB3.3L

PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8
12/15m

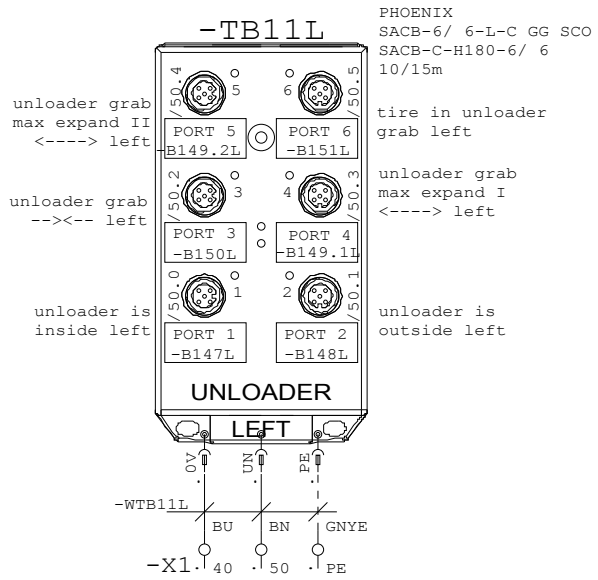


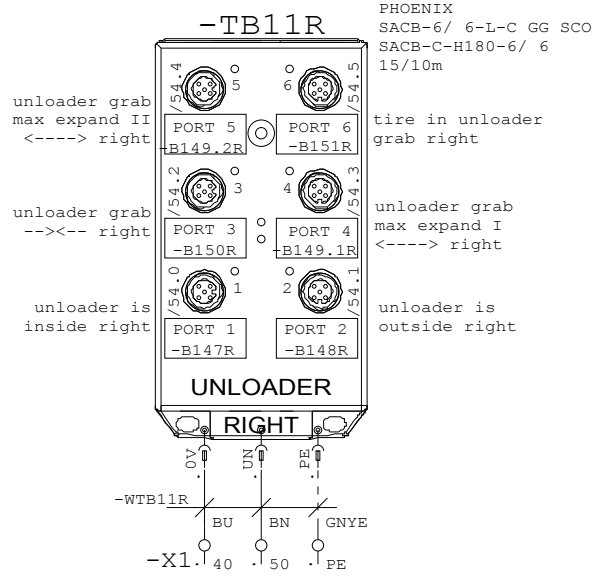
-TB3.3R

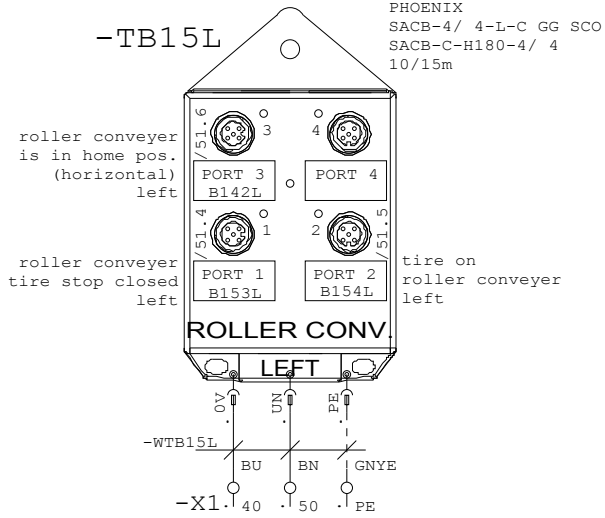
PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8
15/12m

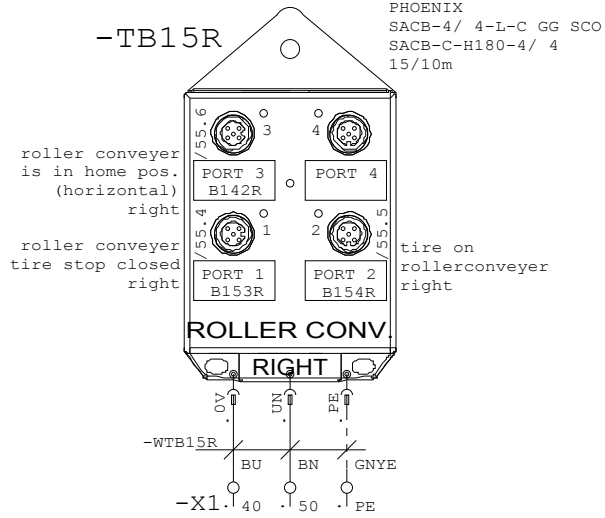


name	Kozakiewicz	05.01.17	**HERBERT**	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH	=
	last changed	06.06.17	Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG		Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)	+
revision			Idustriestrasse 10		Drawing-No.: 6236-090-0000	page 12
	DIN 40719		36088 Huenfeld - GERMANY			of 71 pages





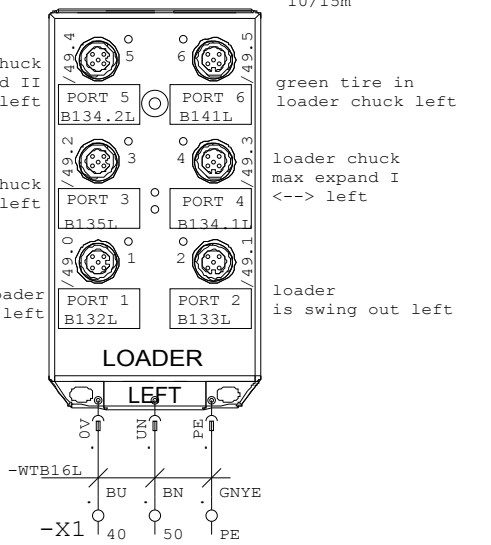




name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	06.06.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				

-TB16L

PHOENIX
SACB-6/ 6-L-C GG SCO
SACB-C-H180-6/ 6
10/15m



loader chuck
max expand II
<--> left

green tire in
loader chuck left

unloader chuck
release --><-- left

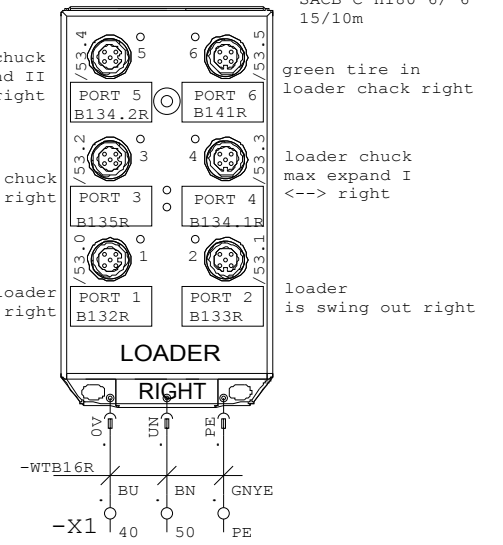
loader chuck
max expand I
<--> left

loader
is swing in left

loader
is swing out left

-TB16R

PHOENIX
SACB-6/ 6-L-C GG SCO
SACB-C-H180-6/ 6
15/10m



loader chuck
max expand II
<--> right

green tire in
loader chack right

loader chuck
release --><-- right

loader chuck
max expand I
<--> right

loader
is swing in right

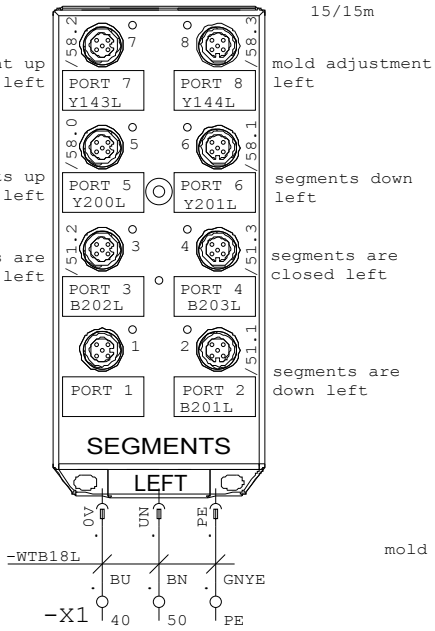
loader
is swing out right

ACTUATOR-/SENSOR DISTRIBUTION BOXES

name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	06.06.17			=
revision					+
	DIN 40719				Drawing-No.: 6236-090-0000 page 14 of 71 pages

-TB18L

PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8
15/15m



mold adjustment up left

mold adjustment down left

segments up left

segments down left

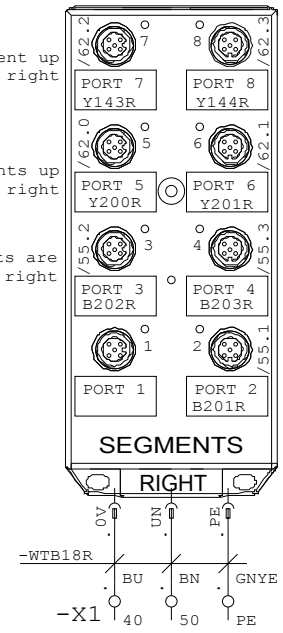
segments are opened left

segments are closed left

segments are down left

-TB18R

PHOENIX
SACB-8/ 8-L-C GG SCO
SACB-C-H180-8/ 8
15/15m



mold adjustment up right

mold adjustment down right

segments up right

segments down right

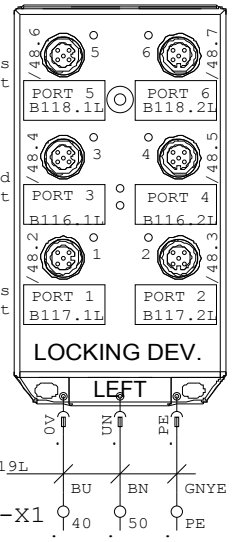
segments are opened right

segments are closed right

segments are down right

-TB19L

PHOENIX
SACB-6/ 6-L-C GG SCO
SACB-C-H180-6/ 6
10/15m



press on top locked I left

press on top locked II left

press closed locked I left

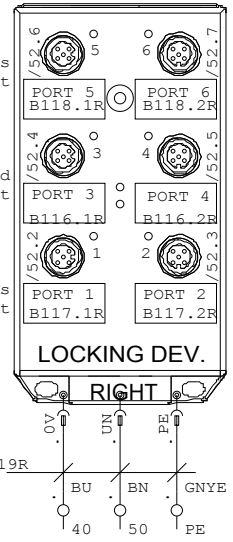
press closed locked II left

press unlocked I left

press unlocked II left

-TB19R

PHOENIX
SACB-6/ 6-L-C GG SCO
SACB-C-H180-6/ 6
15/10m



press on top locked I right

press on top locked II right

press closed locked I right

press closed locked II right

press unlocked I right

press unlocked II right

name	Kozakiewicz	05.01.17
	last changed	06.06.17
revision		
	DIN 40719	

HERBERT
Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG
Idustriestrasse 10
36088 Huenfeld - GERMANY

CIRCUIT DIAGRAM

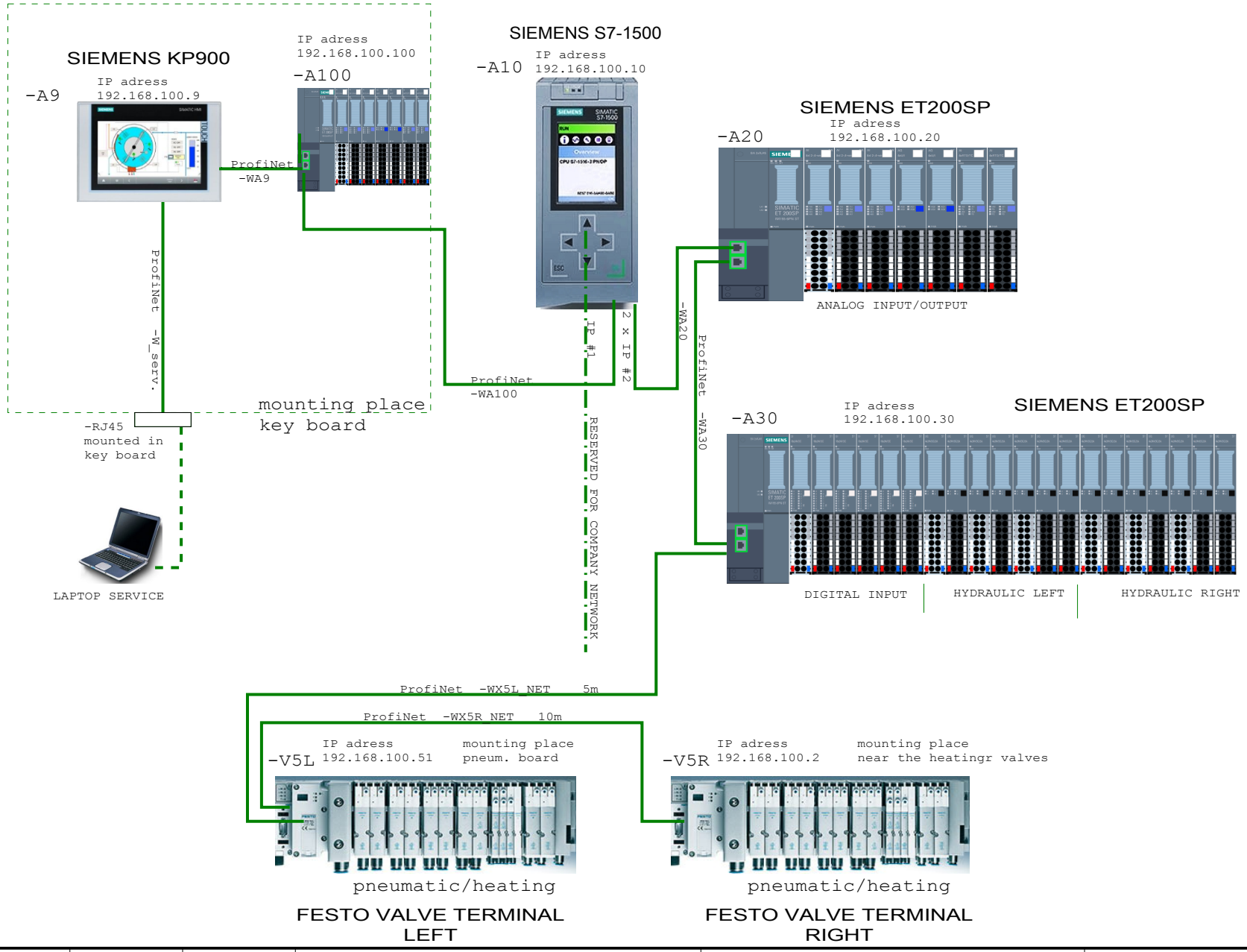
Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH
Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)

=
+

Drawing-No.: 6236-090-0000

previous page 14
next page 16

ProfiNet/Ethernet and interconnection structure



name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)
	last changed	08.06.17			
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000
	DIN 40719				page 17 of 71 pages

previous page 16
next page 18

/8.8 PLC → PLC /20.0
/8.8 50 → 50 /20.0
/8.8 40 → 40 /20.0
/8.8 PE → PE /42.0

-A9 TP900

L+ M PE



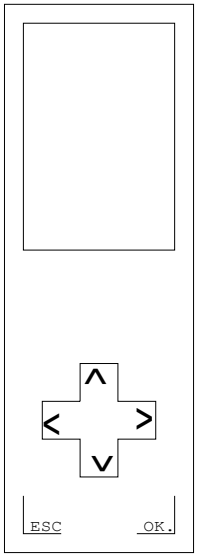
IP adress
192.168.100.9

-A10

1L+ 1M

SIMATIC

CPU S7-1515



IP adress
192.168.100.10

6ES7515-2AM01-0AB0

SIEMENS

name	Kozakiewicz	05.01.17
	last changed	08.06.17
revision		
	DIN 40719	

HERBERT
Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG
Idustriestrasse 10
36088 Huenfeld - GERMANY

CIRCUIT DIAGRAM

Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH
Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)

Drawing-No.: 6236-090-0000

= +

page 18
of 71 pages

PNEUMATIC TERMINAL PRESS left/right
pneumatical movements / hating

/8.8 >51

connection pneumatical muvements

-X1 50 51 40 PE

-WV5L 5G0,75 1 2 3 PE

1 2 3 PE

-V5L

power supply

CPX ETHERNET

ETHERNET 1 2 3 4

On

ADRESS 1 2 3 4 5 6 7 8

On Off

adress pneumatic
192.168.1.51

air supply pneumatic press

base plate 1

unloader swing in

-Y147L/R

-Y152L/R tire stop open

-Y148L/R unloader swing out

base plate 2

unloader chuck expand <---->

-Y149L/R

-Y150L/R unloader chuck --><-- release

loader swing in

-Y132L/R

-Y133L/R loader swing out

base plate 3

loader chuck expand <---->

-Y134L/R

-Y135L/R loader chuck release -><-

on top locking device lock

-Y116L/R

-Y117L/R on top locking device unlock

press left/right

air supply heating press close

base plate 4

steam open

-Y510L/R

-Y511L/R steam closed

Atr Ventilation open

-Y560L/R

-Y561L/R Atr Ventilation close

base plate 5

main drain open

-Y552L/R

-Y553L/R main drain close

shaping/ steam

-Y500/R

-Y565L/R shaping circulation

air supply heating press open& close

connection right

-X1 50 51 40 PE

-WV5R 5G0,75 1 2 3 PE

-V5R

power supply

CPX ETHERNET

ETHERNET 1 2 3 4

On Off

ADRESS 1 2 3 4 5 6 7 8

On Off

adress right
192.168.1.52

name	Kozakiewicz	05.01.17	HERBERT Herbert Maschinen- und Anlagenbau GmbH & Co. KG Idustriestrasse 10 36088 Huenfeld - GERMANY	CIRCUIT DIAGRAM	Project: 6236_Algerien_28 x_AUBO 48-RH	=	
	last changed	18.07.17			Customer: ESI-Algerien (EURL SATEREX-IRISSAT)	+	
revision					Drawing-No.: 6236-090-0000	page 70	
	DIN 40719					of 71 pages	

previous page 69

next page 71

Annexe C

Marquage et Caractéristiques Techniques des Pneus

C.1 Tableau explicatif d'une inscription de pneu

Le tableau C.1 ci-après décompose l'exemple d'inscription **205/55R16 94V**, fréquemment utilisée pour les pneus de tourisme et notamment présente sur la gamme **ECORIS**. Chaque élément de cette désignation fournit des informations précises sur les dimensions, la structure et les performances du pneu.



Figure C.1 : Pneu ECORIS (205/55R16 94V)

Tableau C.1 : Détails de l'inscription 205/55R16 94V sur le pneu ECORIS [2]

Exemple	Élément	Explication
205	Largeur (mm)	Largeur du pneu de flanc à flanc, exprimée en millimètres.
55	Rapport d'aspect (%)	Indique que la hauteur du flanc correspond à 55% de la largeur (soit environ 113 mm ici).
R	Structure radiale	Désigne une carcasse de type radiale, très courante sur les véhicules modernes.
16	Diamètre de jante (pouces)	Représente le diamètre intérieur du pneu, adapté à une jante de 16 pouces.
94	Indice de charge	Correspond à une capacité maximale de charge de 670 kg par pneu (voir tableau spécifique).
V	Indice de vitesse	Signifie que le pneu peut atteindre une vitesse maximale de 240 km/h (voir tableau spécifique).

C.2 Tableau des largeurs de pneus courantes

Le tableau C.2 suivant présente les largeurs de pneus les plus fréquemment rencontrées, accompagnées des catégories de véhicules auxquelles elles sont généralement associées. Cette classification aide à choisir un pneu adapté selon le type de véhicule.

Tableau C.2 : Correspondance entre la largeur de pneu et le type de véhicule [2]

Largeur (mm)	Type de véhicule
135–155	Micro-citadines / voitures très légères
165–185	Citadines / compactes
195–205	Compactes haut de gamme / petits SUV
215–225	Berlines / routières
235–255	Sportives / SUV standards
265 et plus	SUV puissants / 4x4 / utilitaires

C.3 Tableau des rapports d'aspect (hauteur du flanc)

Le tableau C.3 indique comment le rapport d'aspect influence la hauteur du flanc du pneu. Ce ratio, exprimé en pourcentage, a un impact direct sur le confort de conduite et la tenue de route.

Tableau C.3 : Classification des rapports d'aspect selon la hauteur du flanc [2]

Rapport (%)	Description
80–70	Flanc haut (plus de confort, moins de précision)
65–60	Standard (équilibre confort/tenue de route)
55–50	Flanc bas (meilleure tenue de route, look sport)
45–30	Très bas (sportif, moins de confort)

C.4 Type de structure (lettre après le rapport d'aspect)

La lettre située juste après le rapport d'aspect sur un pneu indique son type de structure interne. Le tableau C.4 en détaille les principales variantes ainsi que leurs spécificités techniques.

Tableau C.4 : Interprétation des lettres de structure dans une inscription de pneu [2]

Lettre	Type	Explication
R	Radiale	Structure radiale (la plus utilisée aujourd'hui).
D	Diagonale	Ancienne technologie, encore présente sur certaines motos ou véhicules agricoles.
B	Diagonale ceinturée	Technologie intermédiaire entre la diagonale et la radiale, aujourd'hui rare.

C.5 Diamètre de jante (en pouces)

Le tableau C.5 illustre la correspondance entre le diamètre de la jante — exprimé en pouces — et le type de véhicule concerné. Ce diamètre détermine la taille de la roue sur laquelle le pneu peut être monté.

Tableau C.5 : Correspondance entre le diamètre de jante et le type de véhicule [2]

Diamètre	Utilisation
12–14”	Citadines, petites voitures
15–16”	Compactes, berlines courantes
17–18”	Routières, sportives
19–22”	SUV, 4x4, voitures haut de gamme
23” et plus	SUV de luxe, utilitaires lourds, véhicules tuning spécifiques

C.6 Tableau complet des indices de charge

Le tableau C.6 donne la correspondance entre les indices de charge et la charge maximale qu’un pneu peut supporter, exprimée en kilogrammes. Ces indices sont indiqués à côté de la taille du pneu sur son flanc.

Tableau C.6 : Correspondance entre indice de charge et poids maximal supporté [2]

Indice	Charge max (kg)	Indice	Charge max (kg)
70	335	91	615
71	345	92	630
72	355	93	650
73	365	94	670
74	375	95	690
75	387	96	710
76	400	97	730
77	412	98	750
78	425	99	775
79	437	100	800
80	450	101	825
81	462	102	850
82	475	103	875
83	487	104	900
84	500	105	925
85	515	…	…

C.7 Tableau complet des indices de vitesse

Le tableau C.7 présente les indices de vitesse indiqués sur les pneus. Chaque indice correspond à la vitesse maximale que le pneu peut supporter en toute sécurité, et donne une indication sur le type de véhicule concerné.

Tableau C.7 : Correspondance entre indice de vitesse, limite maximale et usage [2]

Indice	**Vitesse max (km/h)**	**Utilisation typique**
N	140	Utilitaires légers
P	150	Utilitaires
Q	160	Pneus neige, 4x4
R	170	SUV
S	180	Citadines
T	190	Citadines / compactes
U	200	Compactes / routières
H	210	Berlines / grandes routières
V	240	Sportives
W	270	Hautes performances
Y	300	Très hautes performances
(Y)	≥300	Supercars