



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن احمد
Université d'Oran2 Mohamed BenAhmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institute de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en électromécanique

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électromécanique industrielle

Spécialité : Maintenance industrielle et Électromécanique

Thème

Supervision à distance d'un système automatisé : Application à un système agroalimentaire

Présenté et soutenu publiquement par :

KHARROUBI Faouzi
DARAZIRAR Billel

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
TALHI Mama		Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle	Présidente
HACHEMI Khalid		Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle	Examineur
BELHADRI Kheira		Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle	Encadrante

Année universitaire 2025 / 2026

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu, Le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Mme BELHADRI KHEIRA** mon encadrante, pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et sa bienveillance tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Je remercie également l'ensemble des enseignants pour la qualité de l'enseignement reçu durant ces années de formation, qui a grandement contribué à ma progression intellectuelle et personnelle.

Je n'oublie pas d'exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Leur présence a été pour moi un pilier fondamental tout au long de mon parcours.

Enfin, je remercie tous mes amis et collègues de promotion pour leur amitié, leur entraide et les moments partagés qui ont enrichi mon expérience universitaire.

Dédicace

À mes chers parents,

Qui m'ont toujours soutenu avec amour, patience et encouragement...

Que ce travail soit le reflet de leur sacrifice et de leur foi en moi.

À mes frères et sœurs,

Pour leur affection, leur aide et leur présence rassurante.

À mes amis fidèles,

*fianso,yahia,ibrahim,boutkhil,sofien,diduch,moatassem,rafik,taha,ayoub,amine,
omar,farouk,abdou,chikh rafik,rayane,aissa ...*

Avec qui j'ai partagé les joies, les peines, et les longues heures d'étude.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail...

Je vous dédie ce mémoire avec toute ma gratitude et mon respect.

Faouzi & Billel

Résumé

Ce travail porte sur l'automatisation et la supervision à distance d'une installation de remplissage de chocolat, initialement commandée par une logique câblée entièrement manuelle. Après l'analyse du système existant et de ses limites, une solution automatisée a été conçue autour de l'automate programmable industriel Siemens SIMATIC S7-200, assurant control du niveau des trois réservoirs tampons. Le programme développé en langage à contacts (Ladder) sous STEP 7-Micro/WIN, gère un remplissage automatique par seuils de niveau et un vidage manuel sécurisé par interverrouillage. Une interface homme-machine, réalisée sous WinCC flexible, permet la visualisation dynamique du procédé et la commande de ses organes principaux. L'ensemble a été validé par simulation sous PC-SIMU et S7-200 Simulator.

Mots-clés : Automatisation, Automate programmable, S7-200, Supervision, WinCC flexible, Remplissage de chocolat, Ladder.

Abstract

This work deals with the automation and remote supervision of a chocolate filling plant, originally controlled by a fully manual hard-wired logic. After analyzing the existing system and its limitations, an automated solution was designed around the Siemens SIMATIC S7-200, providing control of the three buffer tanks. The program developed in Ladder language under STEP 7-Micro/WIN, manages an automatic filling based on level thresholds and a manual draining secured by interlocking. A human-machine interface, built with WinCC flexible, allows dynamic visualization of the process and control of its main devices. The whole system was validated through simulation using PC-SIMU and the S7-200 Simulator.

Keywords: Automation, Programmable Logic Controller, S7-200, Supervision, WinCC flexible, Chocolate filling, Ladder.

ملخص

يتناول هذا العمل أتمتة منشأة لتعبئة الشوكولاتة والإشراف عليها عن بُعد، بعد أن كانت مُتحكَّماً فيها بمنطق سلبي يدوي بالكامل. بعد تحليل النظام الحالي وحدوده، تم تصميم حل مؤتمت يعتمد على المتحكم المنطقي القابل للبرمجة Siemens SIMATIC S7-200، التي تضمن التحكم في مستوى الخزانات الوسيطة الثلاثة. يقوم برنامج التحكم، المطور بلغة المخطط السلمي (Ladder) عبر STEP 7-Micro/WIN، بإدارة تعبئة آلية حسب عتبات المستوى وتفرغ يدوي مؤمن بالتعاشق المنطقي. كما تتيح واجهة إنسان-آلة، مُنجزَة باستخدام WinCC flexible، عرضاً ديناميكياً للعملية والتحكم في أعضائها الرئيسية. وقد تم التحقق من النظام بأكمله عبر المحاكاة باستخدام PC-SIMU و S7-200 Simulator.

الكلمات المفتاحية: الأتمتة، المتحكم المنطقي القابل للبرمجة، S7-200، الإشراف، WinCC flexible، تعبئة الشوكولاتة، المخطط السلمي.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes automatisés & l'API	2
1.1 Introduction :	3
1.2 Objectifs des systèmes automatisés	3
1.3 Constitution des systèmes automatisés	4
1.4 Partie opérative	4
1.5 La partie commande (PC) :	6
1.6 Le pupitre de commande :	6
1.7 L'automate programmable industriel (API) :	7
1.8 L'interface homme-machine (IHM) :	8
1.9 Conclusion :	9
Chapitre 2 : Analyse du système existant à logique câblée	10
2.1 Introduction :	11
2.2 Présentation du système automatisé par logique câblée :	11
2.3 Description du fonctionnement actuel :	13
2.4 Identification des limitations du système de contrôle existant	14
2.5 Conclusion :	16
Chapitre 3 : Conception et implémentation du système automatisé proposé	17
3.1 Introduction	18
3.2 Cahier des charges	18
3.2.1 Objectif du système automatisé étudié	18
3.2.2 Description fonctionnelle et analyse	19
3.2.2.1 Phase de remplissage (mode automatique)	19
3.2.2.2 Phase de vidage (mode manuelle)	20
3.2.2.3 Contraintes et exigences	20
3.2.3 Identification des entrées/sorties	21
3.2.3.1 Entrées TOR (Tout-Ou-Rien)	21
3.2.3.2 Entrées analogiques	21
3.2.3.3 Sorties TOR	22
3.3 Conception et programmation du système	22
3.3.1 Choix des capteurs et des actionneurs	23
3.3.1.1 Capteurs de niveau du réservoir principal	23

3.3.1.3 Pompes	23
3.3.1.4 Électrovannes	24
3.3.1.5 Les organes de commande	24
3.3.2 Choix de l'automate programmable	24
3.3.2.1 Module d'entrées analogiques EM 231	25
3.3.3 Programmation sous STEP 7-Micro/WIN	25
3.3.3.1 Structure du programme	25
3.3.3.2 Découpage fonctionnel du programme	26
3.3.3.3 Exploitation des entrées analogiques	30
3.3.4 Développement du programme API	30
3.3.4.1 Marche et arrêt général	31
3.3.4.2 Logique de remplissage avec inter-verrouillage	31
3.3.4.3 Logique de vidage avec arrêt automatique de sécurité	31
3.3.4.4 Signalisation lumineuse	31
3.4 Simulation du programme sous PC-SIMU	31
3.4.1 Environnement de simulation	32
3.4.2 Tests de fonctionnement	33
3.4.2.1 Test 1 : Démarrage et arrêt général	33
3.4.2.2 Test 2 : Remplissage automatique d'un tampon	34
3.4.2.3 Test 3 : Vidage manuelle avec arrêt de sécurité	35
3.4.2.4 Test 4 : Interverrouillage entre remplissage et vidage	35
3.4.4 Analyse des résultats et conformité au cahier des charges	35
3.5 Conclusion	36
Chapitre 4 : Supervision du système de contrôle étudié	38
4.1 Introduction	39
4.2 Logiciel de développement du système de supervision	39
4.2.1 Présentation de WinCC flexible 2008	39
4.2.2 Architecture du logiciel	40
4.2.3 Communication avec l'automate	40
4.3 Création et configuration de l'HMI	41
4.3.1 Création du projet	41
4.3.2 Configuration de la liaison de communication	41
4.3.3 Définition des variables de supervision	42
4.4 Conception des différentes vues du projet	43

4.4.1	Structure et organisation des vues	43
4.4.2	Conception du synoptique	44
4.4.3	Animations dynamiques	45
4.4.3.1	Bargraphes des tampons	45
4.4.3.2	Indicateurs des pompes	45
4.4.3.3	Étiquettes dynamiques des électrovannes	45
4.4.4	Organes de commande	46
4.6	Simulation du système	47
4.6.1	Démarrage du Runtime	47
4.6.2	Scénarios de test	47
4.6.2.1	Scénario 1 : Démarrage du système	47
4.6.2.2	Scénario 2 : Passage en mode automatique	48
4.6.2.3	Scénario 3 : Simulation des niveaux	49
4.6.2.4	Scénario 4 : Commande de vidage	49
4.6.2.5	Scénario 5 : Arrêt général	50
4.6.3	Analyse des résultats	50
4.7	Conclusion	52
	Conclusion générale.....	53
	Bibliographie	54

Liste des figures

Figure 1.1: Contacteur [6]	5
Figure 1.2: Moteur asynchrone triphasé [7]	5
Figure 1.3: Electrovanne [8].....	5
Figure 1.4: Capteur de niveau capacitif [9].....	6
Figure 1.5: Capteur de distance laser [10].....	6
Figure 1.6: Pupitre de commande à boutons-poussoirs [11].....	7
Figure 1.7: Architecture interne d'un API [3]	8
Figure 1.8: Automate Siemens SIMATIC S7-200 [12]	8
Figure 1.9: Siemens SIMATIC HMI [13].....	9
Figure 2.1: Réservoir tampon.....	12
Figure 2.2: Réservoir principale.....	12
Figure 2.3: pompe à lobes.....	13
Figure 2.4: pompe à engrenages.....	13
Figure 3.1: Capteur de niveau analogique ifm O1D100 [10].....	23
Figure 3.2: Automate Siemens SIMATIC S7-200 CPU 226 [12].....	25
Figure 3.3: Table des mnémoniques associant les noms symboliques aux adresses physiques	26
Figure 3.4: Réseaux de marche et d'arrêt général du système sous STEP 7-Micro/WIN	26
Figure 3.5: Réseaux de commande de la pompe1.....	27
Figure 3.6: Réseaux d'activation de mode automatique.....	27
Figure 3.7: Réseaux de remplissage automatique	28
Figure 3.8: Réseaux de vidage	29
Figure 3.9: Réseaux de voyants de signalisation.....	30
Figure 3.10: L'interface de logiciel PC-SIMU.....	32
Figure 3.11: Simulateur de S7-200	32
Figure 3.12: Activation du bouton Marche.....	33
Figure 3.13: Arrêt générale d'urgence.....	33
Figure 3.14: Activation mode automatique.....	34
Figure 3.15: Atteinte de seuil haut sur les tompans.....	34
Figure 3.16: Vidage manuelle.....	35
Figure 4.1: Vue de l'éditeur WinCC flexible 2008 Advanced.....	40
Figure 4.2: Configuration de liaison dans WinCC flexible.....	42
Figure 4.3: Liste des variables configurées dans le projet de supervision	43
Figure 4.4: Synoptique de l'installation dans l'éditeur WinCC flexible	44
Figure 4.5: Configuration de l'échelle et de la variable d'un bargraphe.....	45
Figure 4.6: Liste des fonctions associées à l'événement Presser du bouton Marche	46
Figure 4.7: Fonctions associées à l'événement Activer du commutateur Auto/Man	46
Figure 4.8: Vue de l'IHM en mode Runtime à l'état initial	47
Figure 4.9: Activation de la pompe P1 sur appui du bouton Marche.....	48
Figure 4.10 : Activation du mode automatique : pompe P2 et électrovannes de remplissage en marche	48
Figure 4.11: Visualisation simultanée de niveaux différents dans les trois tampons.....	49
Figure 4.12: Commande manuelle du vidage : l'étiquette EVS1 passe sur fond bleu.....	50
Figure 4.13: Retour à l'état initial après commande d'arrêt général	50

Liste des tableaux

Tableau 3-1: Liste des entrées TOR du système	21
Tableau 3-2 : Liste des entrées analogiques du système	22
Tableau 3-3: Liste des sorties TOR du système	22
Tableau 3-4 : Conformité du système au cahier des charges	36
Tableau 4.1: Groupes de variables configurées dans l'IHM.....	42
Tableau 4-2 : : Organes de commande de l'IHM et fonctions associées.....	46

Liste des symboles et abréviations

Abréviation	Signification
API	Automate Programmable Industriel
IHM / HMI	Interface Homme-Machine / Human-Machine Interface
PLC	Programmable Logic Controller
CPU	Central Processing Unit (unité centrale de traitement)
E/S	Entrées / Sorties
TOR	Tout Ou Rien
PO / PC	Partie Opérative / Partie Commande
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
LD	Ladder Diagram (langage à contacts)
FBD	Function Block Diagram (logigramme)
ST	Structured Text (texte structuré)
IL	Instruction List (liste d'instructions)
SFC	Sequential Function Chart (GRAFCET)
RAM	Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
PPI	Point-to-Point Interface
MPI	Multi-Point Interface
EM	Expansion Module (module d'extension)
AIW	Analog Input Word (mot d'entrée analogique)
ASP / AEP	Analog Start Point / Analog End Point
EV / EVS	Électrovanne de remplissage / Électrovanne de vidage
DC	Direct Current (courant continu)
PFE	Projet de Fin d'Études

Introduction générale

L'industrie moderne évolue constamment vers une automatisation accrue. Sous l'effet de la concurrence et des exigences de qualité, les procédés autrefois conduits à la main occupent progressivement la place à des installations pilotées automatiquement et surveillées à distance. Le secteur agroalimentaire n'échappe pas à cette tendance, la régularité du produit, l'hygiène et la traçabilité imposant un contrôle rigoureux de chaque étape de fabrication.

C'est dans cette dynamique que se positionne notre travail. L'automatisation ne consiste pas à remplacer l'homme par la machine, elle a pour objet principal de rendre la production plus régulière, plus sûre et plus économique, tout en libérant l'opérateur des travaux les plus pénibles et les plus répétitifs. Elle permet, en outre, de suivre le déroulement du procédé en temps réel et d'en conserver la trace. Notre projet applique ces principes en automatisant et en permettant la supervision à distance d'une installation de remplissage de chocolat entièrement manuelle jusqu'à présent.

L'objectif est ainsi de concevoir une solution complète, depuis la commande du procédé jusqu'à sa supervision, puis de la valider par simulation avant toute mise en œuvre réelle. Les choix techniques retenus et la démarche suivie sont détaillés tout au long de ce mémoire.

Pour présenter ce travail, le mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier rappelle les notions de base sur les systèmes automatisés et l'automate programmable industriel. Le deuxième analyse l'installation existante, commandée manuellement, et met en évidence ses limites. Le troisième présente la conception et la programmation de la solution automatisée, ainsi que sa validation par simulation. Enfin, le quatrième est consacré à la supervision du procédé à travers une interface homme-machine.

Enfin, une conclusion générale dresse le bilan du travail réalisé et propose quelques perspectives d'amélioration et de prolongement.

Chapitre 1

Généralité sur Les systèmes automatisés & l'automate programmable industriel

1.1. Introduction

Aujourd'hui, il est facile de voir comment les machines ont pris le relais de tâches qui demandaient beaucoup de temps et d'efforts. C'est ce qu'on appelle l'automatisation : donner à un système la responsabilité de faire des choses de manière fiable, sans l'aide de l'être humain [1].

Dans une usine, cela change tout. Les tâches répétitives et les réglages précis ne dépendent plus uniquement de l'attention d'un opérateur. Elles sont confiées à des machines qui peuvent travailler sans arrêt, de manière régulière et précise. Le processus devient alors plus rapide, plus sûr et, surtout, les produits sont toujours identiques.

Au cœur de ces installations se trouve un élément discret mais essentiel : l'automate programmable industriel. C'est vraiment le « cerveau » de la machine. Il reçoit les informations du terrain, prend les décisions et commande chaque partie. Associé à un système de supervision, il permet de suivre le fonctionnement en temps réel et d'intervenir à distance. Cela rend le procédé non seulement automatique, mais aussi clair et facile à maîtriser.

Ce chapitre va explorer cet univers. On va commencer par définir ce qu'on attend d'un système automatisé. Ensuite, on décrira sa structure générale. On distinguera la partie qui agit sur la matière, la partie opérative, de celle qui réfléchit et commande, la partie commande. On s'arrêtera sur deux acteurs clés : le pupitre de commande et l'automate programmable industriel. Enfin, on découvrira l'interface homme-machine, ce point de rencontre entre l'opérateur et la machine, et sa place dans l'industrie d'aujourd'hui.

1.2. Objectifs des systèmes automatisés

L'automatisation des procédés répond à un ensemble d'exigences à la fois technologiques (ou d'ingénierie) et économiques bien précises. Il est essentiel de comprendre ces priorités majeures avant d'analyser les différents éléments matériels qui permettent de les concrétiser. Ces objectifs fondamentaux s'organisent principalement autour des axes suivants [3,4] :

- Amélioration de la productivité et du débit de production
- Optimisation de la sécurité du personnel.
- Minimisation des coûts opérationnels.
- Flexibilité et adaptabilité des lignes de production
- Facilitation de la surveillance et de la supervision à distance.

1.3. Constitution des systèmes automatisés

Un système automatisé désigne l'ensemble des éléments matériels et logiciels qui collaborent afin d'accomplir une tâche de production opérationnelle sans intervention humaine constante. Son fonctionnement est assuré par la circulation d'informations et de commandes entre ses sous-systèmes.

Chaque système automatisé est conçu pour transformer une matière première (matière première, produit semi-fini ou information) en un produit fini en lui conférant une valeur limite précise définie par les spécifications. La transformation est réalisée grâce à un apport coordonné d'énergie (électrique, pneumatique, hydraulique, thermique) et d'informations provenant de capteurs et de l'opérateur [1].

1.4. Partie opérative

La partie opérative d'un système automatisé regroupe l'ensemble des constituants physiques qui interagissent directement avec la matière d'œuvre ou l'environnement à piloter. Elle est structurée en trois classes d'éléments : les pré-actionneurs, les actionneurs et les capteurs. Conjointement, ces composants constituent l'interface de liaison entre la partie commande dédiée au traitement de l'information et l'environnement physique [3].

1.4.1. Pré-actionneurs

Les pré-actionneurs sont des dispositifs qui modulent et convertissent l'énergie, jouant le rôle d'intermédiaires entre les signaux de sortie à faible puissance de l'unité de commande et les actionneurs à forte puissance qu'ils contrôlent. Ils ont pour rôle principal d'amplifier et de mettre en forme le signal de commande pour délivrer l'énergie nécessaire à l'actionneur.

On peut distinguer trois grandes familles de pré-actionneurs selon la nature de l'énergie transmise [3] : les pré-actionneurs électriques (figures 1.1), les pré-actionneurs pneumatiques et les pré-actionneurs hydrauliques.



Figure 1.1: Contacteur [6]

1.4.2. Les actionneurs :

Les actionneurs sont les éléments terminaux de la partie opérative qui convertissent une énergie d'entrée (électrique, pneumatique ou hydraulique) en une action mécanique exercée directement sur la matière d'œuvre. Ils représentent l'organe d'exécution effectif du système automatisé.

On distingue trois grandes familles d'actionneurs, selon la nature de l'énergie utilisée [3] : Les actionneurs électriques (figure 1.2 et 1.3), les actionneurs pneumatiques et les actionneurs hydrauliques.



Figure 1.2: Moteur asynchrone triphasé [7]



Figure 1.3: Electrovanne [8]

1.4.3. Les capteurs :

Les capteurs constituent les organes de détection chargés d'acquérir une grandeur physique inhérente à l'état instantané du procédé, afin de la convertir en un signal électrique exploitable par la partie commande. Ils assurent ainsi le bouclage et le retour d'information opérationnel, indispensables à la régulation et au séquençement déterministe du cycle automatisé.

On classe les capteurs selon la nature du signal délivré [3] : les capteurs tout ou rien (TOR) (figure 1.4), les capteurs analogiques (figure 1.5) et les capteurs numériques.



Figure 1.4: Capteur de niveau capacitif [9]



Figure 1.5: Capteur de distance laser [10]

1.5. La partie commande (PC) :

La partie commande constitue le centre de traitement et de décision du système automatisé. Elle a pour fonction de recevoir les informations issues des capteurs de la partie opérative ainsi que les consignes transmises par l'opérateur, de les traiter selon une logique préétablie, puis d'élaborer les ordres destinés aux pré-actionneurs. Elle assure ainsi la coordination de l'ensemble du cycle de fonctionnement [3,5].

1.6. Le pupitre de commande :

Le pupitre de commande constitue l'interface physique câblée permettant à l'opérateur d'agir directement sur le système et d'en visualiser l'état de façon immédiate. Il regroupe les organes de commande et de signalisation suivants :

- Les boutons-poussoirs (marche, arrêt, acquittement).
- Les commutateurs et sélecteurs de mode (manuel / automatique / maintenance) Les commutateurs et sélecteurs de mode (manuel / automatique / maintenance).
- Les voyants lumineux de signalisation d'état et de défaut.
- Le bouton d'arrêt d'urgence (*coup de poing*), élément de sécurité prioritaire.
- Éventuellement des potentiomètres de réglage de consignes.

Le pupitre câblé offre une commande fiable et indépendante du logiciel, ce qui le rend indispensable aux fonctions de sécurité [4].



Figure 1.6: Pupitre de commande à boutons-poussoirs [11]

1.7. L'automate programmable industriel (API) :

L'automate programmable industriel (API) représente l'unité de traitement centrale du système. C'est un ordinateur logique spécialisé, conçu pour fonctionner en environnement industriel sévère (vibrations, perturbations électromagnétiques, fortes amplitudes thermiques) [3,5]. Il se compose principalement des éléments suivants :

- L'unité centrale de traitement (CPU) : elle exécute le programme utilisateur et orchestre les échanges entre modules.
- Les mémoires : mémoire de programme (EEPROM ou Flash, non volatile), mémoire de données (RAM) et mémoire système.
- Les modules d'entrées/sorties (E/S) : interface électrique entre l'automate et les composants de terrain, de type tout-ou-rien (TOR) ou analogique.
- Le module d'alimentation : il délivre les tensions stabilisées nécessaires (typiquement 24 V DC).
- Les modules de communication : ils assurent l'échange de données via les réseaux industriels (Profinet, Modbus TCP, OPC-UA).

Le fonctionnement de l'API repose sur un cycle de scrutation périodique (*scan cycle*) en trois phases: la lecture des entrées, l'exécution du programme utilisateur, puis la mise à jour des sorties. Sa programmation est normalisée par la norme CEI 61131-3, qui définit cinq langages : le schéma à contacts (LD), le logigramme (FBD), le texte structuré (ST), la liste d'instructions (IL) et le graphe fonctionnel étape-transition (SFC / GRAFCET).

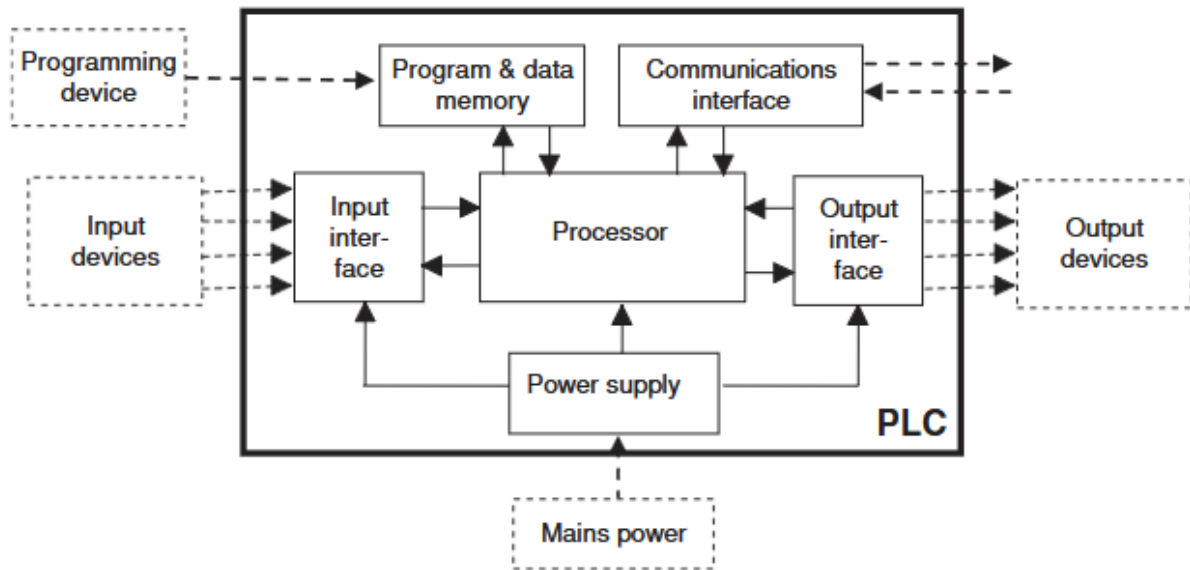


Figure 1.7: Architecture interne d'un API [3]



Figure1.8: Automate Siemens SIMATIC S7-200 [12]

1.8. L'interface homme-machine (IHM) :

L'interface homme-machine (IHM), ou Human-Machine Interface (HMI), assure le dialogue évolué entre l'opérateur et le système automatisé. Contrairement au pupitre câblé, elle repose sur une interface graphique logicielle offrant des fonctionnalités étendues [2,5] :

- La visualisation de l'état du procédé à travers des synoptiques animés.
- L'affichage et l'acquittement des alarmes.
- La saisie des consignes et des paramètres opératoires.
- L'archivage des données historiques et la génération de courbes de tendance.
- La gestion des recettes de production.

Selon le niveau de complexité, l'IHM peut prendre la forme d'un terminal à écran tactile (Siemens SIMATIC HMI, Schneider Magelis) ou d'un poste de supervision SCADA déployé sur PC

industriel, capable de superviser plusieurs automates simultanément et d'assurer la supervision à distance.



Figure 1.9: Siemens SIMATIC HMI [13]

1.9. Conclusion :

Ce chapitre a permis de poser les fondements théoriques cruciales à la compréhension des systèmes automatisés et de leurs constituants. Après avoir défini la notion d'automatisation et exposé ses principaux objectifs technologiques et économiques, nous avons décrit l'architecture générale d'un système automatisé.

Cette architecture s'articule autour de la partie opérative comprenant les capteurs, les pré-actionneurs et les actionneurs ainsi que de la partie commande, qui regroupe le pupitre de commande, l'automate programmable industriel et l'interface homme-machine. L'étude de ces différents constituants a mis en évidence le rôle central de l'API, véritable cœur décisionnel du système, ainsi que l'importance croissante des interfaces de supervision dans le contexte de l'industrie 4.0.

Les notions abordées dans ce chapitre constituent le socle indispensable à la suite du travail. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'installation actuelle. Il s'agit d'analyser le fonctionnement du système de commande existant, d'identifier ses composants et ses limites, afin de justifier la nécessité d'une migration vers une solution automatisée programmable.

Chapitre 2

Analyse et étude du système de contrôle existant à logique câblée

2.1. Introduction

Avant l'apparition des automates programmables industriels, les systèmes automatisés étaient commandés uniquement par la logique câblée, dans laquelle la loi de commande est matérialisée par l'interconnexion physique de composants discrets (relais électromagnétiques, contacteurs, temporisateurs et boutons-poussoirs) reliés entre eux par câblage [14]. Cette technologie permet d'exécuter chaque fonction logique par des moyens matériels, et toute modification du fonctionnement nécessite d'intervenir directement sur le câblage de l'installation.

L'analyse du système de contrôle proposé existant dans l'unité (SARL Kamelo Food) constitue un préalable indispensable à tout projet de rénovation ou de migration vers une solution programmée. Elle permet de saisir le principe de fonctionnement de l'installation existante, d'identifier ses éléments constitutifs et de mettre en évidence ses insuffisances par rapport aux exigences de productivité, de flexibilité et de supervision de l'industrie moderne.

L'objectif de ce chapitre est de présenter et d'analyser le système de contrôle par logique câblée mis en œuvre. Nous décrirons donc d'abord le procédé et ses éléments constitutifs, puis nous exposerons les limites de cette technologie qui motivent le passage à une solution automatisée à base d'automate programmable industriel.

2.2. Présentation du système proposé par logique câblée

Le système étudié est une installation de remplissage de chocolat mise en œuvre au niveau de SARL Kamelo Food. Elle assure le transfert et la distribution d'un produit liquide (chocolat fondu) depuis un réservoir principal vers trois réservoirs tampons (Figure 2.1). Dans sa configuration actuelle, l'installation est commandée par une logique câblée, technologie dans laquelle la loi de commande est entièrement matérialisée par l'interconnexion physique de composants électromécaniques relais, contacteurs et boutons-poussoirs sans recours à un quelconque traitement programmé [14,15].

Le système se compose des constituants suivants :

- Un réservoir principal (Figure 2.2), destiné au stockage du chocolat fondu.
- Trois réservoirs tampons (Figure 2.1), alimentés à partir du réservoir principal et assurant l'approvisionnement de la machine d'enrobage.
- Deux pompes volumétriques rotatives assurant le transfert du produit. La première (P1) est une pompe à lobes (Figure 2.3), particulièrement adaptée aux fluides visqueux et fragiles : ses deux rotors en forme de lobes n'entrent jamais en contact, ce qui garantit un pompage doux préservant la qualité du chocolat. Elle achemine le chocolat depuis la partie préparation vers le réservoir principal. La seconde (P2) est une pompe à engrenages (Figure 2.4), qui délivre un débit régulier et maîtrisé sous pression élevée ; elle refoule le chocolat depuis le réservoir principal vers les réservoirs tampons.
- Des électrovannes tout-ou-rien (TOR), commandées électriquement, qui assurent l'ouverture et la fermeture des circuits de transfert du produit.
- Un pupitre de commande câblé, regroupant les boutons-poussoirs de marche et d'arrêt (vert / rouge) ainsi que les sélecteurs associés à chaque circuit.

Il convient de souligner que l'installation actuelle ne comporte aucun capteur de niveau ni aucun dispositif de signalisation visuelle (colonnes lumineuses). La surveillance du niveau de remplissage des réservoirs repose donc entièrement sur l'appréciation visuelle de l'opérateur, ce qui constitue l'une des principales limites du système existant.



Figure 2.1: Réservoir tampon



Figure 2.2: Réservoir principale



Figure 2.3: pompe à lobes



Figure 2.4: pompe à engrenages

2.3. Description du fonctionnement actuel

Le fonctionnement du système repose intégralement sur l'intervention manuelle de l'opérateur, qui commande chaque étape du cycle à l'aide des boutons-poussoirs du pupitre. La logique câblée se limite ainsi à établir ou interrompre les circuits de puissance alimentant les pompes et les électrovannes, sans aucune séquence automatique ni temporisation.

Le déroulement du cycle s'effectue selon les étapes suivantes :

a. Remplissage du réservoir principal

L'opérateur actionne le bouton-poussoir de marche associé à la pompe P1. Le contacteur correspondant se ferme, mettant la pompe sous tension et amorçant le transfert du chocolat depuis la source vers le réservoir principal. L'opérateur surveille visuellement le niveau de remplissage et actionne le bouton d'arrêt lorsqu'il estime que le réservoir est suffisamment rempli.

b. Remplissage des réservoirs tampons

Une fois le réservoir principal rempli, l'opérateur déclenche le remplissage des réservoirs tampons. En appuyant sur le bouton de marche correspondant, on met en service simultanément la pompe P2 et on ouvre l'électrovanne du réservoir tampon choisi. Le produit est ensuite repoussé vers ce réservoir. Là encore, l'arrêt du transfert est commandé manuellement par l'opérateur d'après sa constatation visuelle.

c. Vidage des réservoirs tampons

Le vidage s'effectue également de manière manuelle : l'opérateur actionne le bouton-poussoir correspondant, ce qui commande l'ouverture de l'électrovanne de sortie du réservoir tampon concerné. Le chocolat est alors acheminé vers la machine d'enrobage. La fermeture de l'électrovanne, et donc l'arrêt du vidage, relève une nouvelle fois de la décision de l'opérateur.

·
Ce mode de fonctionnement, entièrement tributaire de l'intervention humaine, met en évidence le caractère rudimentaire de la commande par logique câblée et justifie la nécessité d'une automatisation du procédé, objet des chapitres suivants.

2.4. Identification des limitations du système de contrôle existant

L'analyse du fonctionnement actuel met en évidence plusieurs limitations inhérentes à la technologie de la logique câblée, lesquelles compromettent la productivité, la sécurité et la fiabilité de l'installation [1,14] :

a) Absence de régulation automatique de niveau

Le système ne comporte aucun capteur de niveau. Le remplissage et le vidage des réservoirs reposent exclusivement sur l'appréciation visuelle de l'opérateur, ce qui expose l'installation à des risques de débordement ou de marche à vide des pompes. Cette dernière condition est particulièrement préjudiciable pour les pompes volumétriques, dont le fonctionnement à sec entraîne une usure prématurée.

b) Dépendance totale vis-à-vis de l'opérateur

Chaque étape du cycle étant commandée manuellement, le procédé est entièrement tributaire de la disponibilité et de la vigilance du personnel. Cette dépendance accroît le risque d'erreurs humaines et limite la répétabilité du processus, au détriment de la régularité de la production.

c) Rigidité et difficulté d'évolution

Dans une logique câblée, la loi de commande est matérialisée par le câblage physique des composants. Toute modification du fonctionnement — ajout d'une temporisation, d'un asservissement ou d'un nouveau mode de marche — nécessite une intervention matérielle sur l'armoire électrique, opération coûteuse en temps et source potentielle d'erreurs de raccordement.

d) Maintenance complexe et diagnostic difficile

Le nombre élevé de relais, de contacteurs et de connexions filaires complique considérablement la recherche de pannes. L'absence de signalisation centralisée et d'historique des défauts allonge les durées d'intervention et, par conséquent, les temps d'arrêt de production.

e) Encombrement et coût

La multiplication des composants électromécaniques se traduit par un encombrement important de l'armoire de commande ainsi que par un coût de câblage et de maintenance élevé, sans possibilité de supervision ni de traçabilité du procédé.

f) Absence de supervision et de communication

Le système existant ne permet aucune visualisation de l'état du procédé en temps réel, ni aucun échange de données avec un système de niveau supérieur. Il demeure ainsi incompatible avec les exigences de supervision et de traçabilité propres à l'industrie moderne.

L'ensemble de ces limitations justifie pleinement la nécessité de moderniser l'installation par la mise en œuvre d'une commande programmée à base d'automate programmable industriel, associée à une interface de supervision.

2.5. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'analyse du système de commande existant de l'installation de remplissage de chocolat, reposant sur la technologie de logique câblée. Après avoir présenté la constitution du système, nous avons décrit son fonctionnement actuel, entièrement manuel, pour comprendre les principes de base.

L'analyse a montré le caractère rudimentaire de la commande logique câblée, dans laquelle chaque action dépend de l'intervention directe de l'opérateur, sans aucun détecteur de niveau ni aucun système de supervision. Ces limites : rigidité fonctionnelle, dépendance humaine, difficulté de maintenance et absence de suivi en temps réel. Sont autant d'éléments qui soulignent le décalage de cette technologie par rapport aux exigences actuelles en matière de productivité, de flexibilité et de traçabilité.

Ces constats justifient la nécessité d'une migration vers une solution automatisée. Le chapitre suivant sera consacré à la conception et à la mise en œuvre d'une commande programmée à base d'automate programmable industriel (API), ainsi qu'à la définition de l'architecture matérielle et logicielle de la nouvelle installation

Chapitre 3

Conception et implémentation du système automatisé proposé

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit l'analyse du système existant à logique câblée et souligné ses limites. Le présent chapitre traite de la conception et de la réalisation de la solution automatisée proposée pour l'installation de remplissage de chocolat. L'objectif est de remplacer la commande manuelle par une commande programmable, fiable, télé supervisable et permettant de gérer de façon coordonnée et sécurisée le remplissage et le vidage des trois réservoirs tampons.

La démarche retenue se base sur quatre axes complémentaires. Le premier consiste à définir le cahier des charges fonctionnel du système en précisant les objectifs, la description fonctionnelle et l'inventaire des entrées/sorties. Le deuxième axe concerne la conception et le choix matériel, comprenant la sélection des capteurs, des pré-actionneurs et de l'automate programmable. Le troisième axe est consacré au développement du programme de commande dans l'environnement STEP 7-Micro/WIN. Enfin, le quatrième axe présente la validation du fonctionnement par simulation sous PC-SIMU.

Cette démarche progressive permet de garantir la cohérence entre les besoins exprimés dans le cahier des charges, les choix techniques retenus et le comportement réel obtenu lors de la simulation.

3.2 Cahier des charges

Le cahier des charges constitue le document de référence qui guide l'ensemble des étapes de conception. Il formalise les besoins fonctionnels du système, les contraintes techniques à respecter et les performances attendues. Sa rigueur conditionne directement la qualité de l'automatisme livré.

3.2.1 Objectif du système automatisé étudié

Le système automatisé proposé doit assurer la continuité du procédé de remplissage de chocolat fondu, depuis la cuve de préparation jusqu'aux trois réservoirs tampons alimentant la machine d'enrobage. Cette automatisation vise à remplacer la commande à logique câblée existante, dont les limitations en termes de flexibilité et de surveillance ont été mises en évidence dans le chapitre précédent.

Les objectifs principaux assignés au nouveau système peuvent être résumés comme suit :

- **Automatisation du remplissage** : gestion automatique du transfert du chocolat depuis le réservoir principal vers les trois tampons en fonction du niveau mesuré dans chacun d'eux.
- **Surveillance des niveaux** : acquisition continue du niveau de chaque tampon à l'aide de capteurs de mesure de distance, et déclenchement de seuils de sécurité.
- **Coordination des actionneurs** : commande synchronisée des deux pompes et des six électrovannes (trois pour le remplissage et trois pour le vidage).
- **Mode de fonctionnement flexible** : intégration d'un mode automatique pour le remplissage et d'un mode manuel pour le vidage, permettant à l'opérateur d'intervenir selon les besoins de production.
- **Supervision à distance** : mise à disposition d'une interface homme-machine (IHM) permettant à l'opérateur de visualiser l'état du procédé, d'agir sur les commandes principales et de suivre l'évolution des niveaux en temps réel.
- **Sécurité de fonctionnement** : intégration d'un arrêt général d'urgence et d'interverrouillages logiques entre les phases de remplissage et de vidage pour éviter tout conflit fonctionnel.

Ces objectifs s'inscrivent dans la logique de l'automatisation industrielle moderne, qui vise non seulement à augmenter la productivité, mais aussi à améliorer la sécurité, la traçabilité et la qualité du produit fini [1].

3.2.2 Description fonctionnelle et analyse

Le procédé étudié peut être décomposé en deux phases principales, exécutées de manière cyclique et coordonnée.

3.2.2.1 Phase de remplissage (mode automatique)

La phase de remplissage est entièrement automatisée et coordonne le fonctionnement des deux pompes avec celui des trois électrovannes d'entrée. Son déroulement est le suivant :

- L'opérateur ferme le contacteur de marche générale, ce qui active l'état général du système.
- La pompe à lobes (P1) transfère le chocolat depuis la cuve de préparation vers le réservoir principal. Le remplissage se poursuit jusqu'à l'activation du capteur de niveau haut, qui déclenche l'arrêt de P1.

- Lorsque le sélecteur Auto/Manuel est positionné en mode automatique, la pompe à engrenages (P2) est mise en marche. Elle assure le transfert du chocolat depuis le réservoir principal vers les trois tampons via une conduite commune.
- Chaque tampon est associé à une électrovanne de remplissage (EV1, EV2, EV3). Lorsque le niveau mesuré dans un tampon descend en dessous du seuil bas (environ 20 %), l'électrovanne correspondante s'ouvre et le tampon se remplit.
- Lorsque le niveau atteint le seuil haut (environ 80 %), l'électrovanne se referme et le remplissage s'arrête pour ce tampon.
- La pompe P2 continue de fonctionner tant qu'au moins un tampon nécessite d'être rempli.

3.2.2.2 Phase de vidage (mode manuelle)

La phase de vidage est commandée manuellement par l'opérateur. Elle utilise les trois électrovannes de sortie (EVS1, EVS2, EVS3) placées respectivement sur la conduite de sortie de chaque tampon vers la machine d'enrobage. Son déroulement est le suivant :

- L'opérateur appuie sur le bouton de marche de vidage associé au tampon souhaité. L'électrovanne de vidage correspondante s'ouvre, libérant le chocolat vers la machine d'enrobage.
- Le vidage se poursuit jusqu'à l'appui sur le bouton d'arrêt, ou jusqu'à ce que le niveau dans le tampon atteigne un seuil minimum de sécurité (environ 5 %), auquel cas la fermeture est commandée automatiquement par le programme afin d'éviter le désamorçage.
- Un verrouillage logique empêche l'ouverture simultanée de l'électrovanne de remplissage et de l'électrovanne de vidage d'un même tampon.

3.2.2.3 Contraintes et exigences

Plusieurs contraintes ont été prises en compte lors de la conception :

- **Continuité du procédé** : le fonctionnement doit être ininterrompu tant qu'aucun défaut majeur n'est détecté.
- **Réversibilité** : le système doit pouvoir être arrêté à tout moment via le bouton d'arrêt général, qui remet l'ensemble des sorties à l'état repos.
- **Modularité** : le programme doit être structuré en réseaux indépendants pour chaque tampon, facilitant la maintenance et l'évolution future.

- **Précision de mesure** : les capteurs analogiques choisis doivent garantir une mesure fiable du niveau de chocolat, malgré la viscosité et la température élevée du produit.

3.2.3 Identification des entrées/sorties

L'inventaire des entrées et sorties constitue une étape déterminante : il conditionne directement le choix de l'automate, de ses modules d'extension et le dimensionnement du câblage. À partir de l'analyse fonctionnelle précédente, nous avons identifié les variables logiques (TOR) et analogiques nécessaires au pilotage du procédé.

3.2.3.1 Entrées TOR (Tout-Ou-Rien)

Le système comporte onze entrées logiques destinées aux boutons-poussoirs, au sélecteur de mode et aux capteurs TOR du réservoir principal :

Adresse	Symbole	Désignation
I0.0	Marche_Gen	Bouton de marche générale
I0.1	Arret_Gen	Bouton d'arrêt général d'urgence (NF)
I0.2	Capt_Min_Res	Capteur de niveau minimal du réservoir principal
I0.3	Capt_Max_Res	Capteur de niveau maximal du réservoir principal
I0.4	Sel_Auto	Sélecteur du mode automatique
I0.5	Marche_Vid_T1	Bouton marche vidage Tampon 1
I0.6	Arret_Vid_T1	Bouton arrêt vidage Tampon 1 (NF)
I0.7	Marche_Vid_T2	Bouton marche vidage Tampon 2
I1.0	Arret_Vid_T2	Bouton arrêt vidage Tampon 2 (NF)
I1.1	Marche_Vid_T3	Bouton marche vidage Tampon 3
I1.2	Arret_Vid_T3	Bouton arrêt vidage Tampon 3 (NF)

Tableau 3-1: Liste des entrées TOR du système

3.2.3.2 Entrées analogiques

La mesure continue du niveau dans les trois réservoirs tampons est réalisée à l'aide de capteurs analogiques de distance fournissant un signal courant 4-20 mA, traité par le module d'entrées analogiques de l'automate :

Adresse	Symbole	Désignation
AIW0	Niveau_T1	Capteur de niveau analogique Tampon 1
AIW2	Niveau_T2	Capteur de niveau analogique Tampon 2
AIW4	Niveau_T3	Capteur de niveau analogique Tampon 3

Tableau 3-2 : Liste des entrées analogiques du système

3.2.3.3 Sorties TOR

Le système commande seize sorties logiques destinées aux pré-actionneurs (contacteurs des pompes, bobines des électrovannes) et aux voyants de signalisation :

Adresse	Symbole	Désignation
Q0.0	P1	Pompe à lobes (préparation → réservoir principal)
Q0.1	P2	Pompe à engrenages (réservoir principal → tampons)
Q0.2	EV_Rem_T1	Électrovanne de remplissage Tampon 1
Q0.3	EV_Rem_T2	Électrovanne de remplissage Tampon 2
Q0.4	EV_Rem_T3	Électrovanne de remplissage Tampon 3
Q0.5	EV_Vid_T1	Électrovanne de vidage Tampon 1
Q0.6	EV_Vid_T2	Électrovanne de vidage Tampon 2
Q0.7	EV_Vid_T3	Électrovanne de vidage Tampon 3
Q1.0	Voy_Vert_Gen	Voyant vert de marche générale
Q1.1	Voy_Auto	Voyant du mode automatique
Q1.2	Voy_Jaune_T1	Voyant jaune Tampon 1 (activité)
Q1.3	Voy_Rouge_T1	Voyant rouge Tampon 1 (plein)
Q1.4	Voy_Jaune_T2	Voyant jaune Tampon 2 (activité)
Q1.5	Voy_Rouge_T2	Voyant rouge Tampon 2 (plein)
Q1.6	Voy_Jaune_T3	Voyant jaune Tampon 3 (activité)
Q1.7	Voy_Rouge_T3	Voyant rouge Tampon 3 (plein)

Tableau 3-3: Liste des sorties TOR du système

3.3 Conception et programmation du système

Cette section présente les choix matériels retenus pour la mise en œuvre de l'automatisme, ainsi que le développement du programme de commande sous l'environnement STEP 7-Micro/WIN.

3.3.1 Choix des capteurs et des actionneurs

Le choix des composants est guidé par les contraintes du procédé (chocolat fondu, agroalimentaire, viscosité élevée) et par la nature des signaux à acquérir ou à commander.

3.3.1.1 Capteurs de niveau du réservoir principal

Le réservoir principal est équipé de deux capteurs de niveau de type tout-ou-rien (TOR) : un capteur de niveau bas et un capteur de niveau haut. Ces capteurs sont des détecteurs capacitifs sans contact, particulièrement adaptés aux applications agroalimentaires où le produit ne doit pas être contaminé [9]. Elles fonctionnent selon un principe fondé sur la variation de capacité électrique provoquée par la présence du milieu chocolaté à proximité de l'électrode. Ils envoient un signal logique 24 V DC vers l'entrée TOR de l'automate.

3.3.1.2 Capteurs de niveau des tampons

Pour la mesure continue du niveau dans les tampons, le choix s'est porté sur des capteurs laser de distance de type ifm O1D100 (Figure 3.1). Ce choix est motivé par plusieurs avantages : la mesure est totalement sans contact, ce qui élimine tout risque de contamination, la plage de mesure (0,2 m à 10 m) couvre largement la hauteur des tampons, et la sortie courant 4-20 mA est directement compatible avec le module d'entrées analogiques de l'automate.

Le paramétrage du capteur a été réalisé de manière inversée : ASP (Analog Start Point) correspond à la distance maximale (tampon vide) et AEP (Analog End Point) à la distance minimale (tampon plein). Ainsi, lorsque le niveau de chocolat est élevé, la distance mesurée est faible, et le courant délivré est proche de 20 mA. Cette configuration garantit une cohérence logique entre la valeur numérique convertie par l'automate et le niveau physique du produit.



Figure 3.1: Capteur de niveau analogique ifm O1D100 [10]

3.3.1.3 Pompes

Deux pompes électriques assurent le transfert du chocolat dans l'installation. La pompe P1 est une pompe à lobes, particulièrement adaptée au pompage de fluides visqueux dans le secteur

agroalimentaire. La pompe P2 est une pompe à engrenages, utilisée pour le transfert depuis le réservoir principal vers les tampons [7].

3.3.1.4 Électrovannes

Six électrovannes assurent le contrôle du débit dans les conduites : trois électrovannes EV1, EV2, EV3 commandent le remplissage des tampons depuis le réservoir principal, et trois électrovannes EVS1, EVS2, EVS3 commandent leur vidage. Les électrovannes retenues sont de type tout-ou-rien à bobine 24 V continu, choisies pour leur fiabilité dans les applications agroalimentaires [8].

3.3.1.5 Les organes de commande

Les boutons-poussoirs et le sélecteur de mode sont des organes de dialogue homme-machine de la gamme industrielle SIRIUS ACT [11], offrant une grande robustesse en milieu industriel.

3.3.2 Choix de l'automate programmable

Le bilan des entrées/sorties établi précédemment (11 entrées TOR + 3 entrées analogiques + 16 sorties TOR) ainsi que les exigences de communication avec une interface de supervision ont conduit au choix de l'automate Siemens SIMATIC S7-200, CPU 226 (Figure 3.2). Ce choix s'appuie sur plusieurs critères:

- **Capacité en E/S intégrées** : le CPU 226 dispose de 24 entrées TOR et de 16 sorties TOR intégrées, ce qui couvre la totalité des E/S logiques requises.
- **Extensibilité** : le S7-200 supporte jusqu'à sept modules d'extension, permettant d'ajouter facilement des modules d'entrées/sorties analogiques ou numériques.
- **Performances** : la vitesse d'exécution est compatible avec la cyclicité requise par le procédé (temps de cycle inférieur à 10 ms).
- **Coût et disponibilité** : l'automate est largement répandu dans le tissu industriel local et présente un excellent rapport qualité/prix.
- **Environnement de développement** : le logiciel STEP 7-Micro/WIN, gratuit et largement documenté, est parfaitement adapté à la programmation d'applications de taille moyenne.



Figure 3.2: Automate Siemens SIMATIC S7-200 CPU 226 [12]

3.3.2.1 Module d'entrées analogiques EM 231

Pour acquérir les trois signaux 4-20 mA délivrés par les capteurs O1D100, un module d'extension d'entrées analogiques EM 231 est associé au CPU 226 [12]. Ce module offre quatre voies analogiques configurables en tension ou en courant, avec une résolution de 12 bits. Les voies utilisées (AIW0, AIW2, AIW4) sont configurées en mode courant 4-20 mA, ce qui correspond à une plage numérique allant de 6 400 (pour 4 mA) à 32 000 (pour 20 mA).

3.3.3 Programmation sous STEP 7-Micro/WIN

Le programme de commande a été développé dans l'environnement STEP 7-Micro/WIN, à l'aide du langage à contacts (LADDER) [12]. Ce langage, normalisé par la CEI 61131-3, est particulièrement adapté aux automaticiens car il s'inspire directement des schémas électriques à relais [3].

3.3.3.1 Structure du programme

Le programme est structuré en réseaux indépendants, chacun dédié à une fonction précise. Cette organisation modulaire facilite la lecture, le débogage et la maintenance ultérieure. La table des mnémoniques (Figure 3.3) a été utilisée pour associer à chaque adresse physique un nom symbolique explicite (Marche_Gen pour I0.0, P1 pour Q0.0, Niveau_T1 pour AIW0, etc.). Cette pratique améliore considérablement la lisibilité du programme et réduit le risque d'erreur lors de la programmation.

	Nom	Adresse	Commentaire
1	Marche_Gen	I0.0	Bouton marche generale
2	Arret_Gen	I0.1	Bouton arret generale
3	Capt_min_res	I0.2	Capteur niveau MIN reservoir
4	Capt_max_res	I0.3	Capteur niveau MAX reservoir
5	Sel_auto	I0.4	selecteur mode automatique
6	Marche_Vid_T1	I0.5	marche vidange tompon 1
7	Arret_Vid_T1	I0.6	arret vidange tompon 1
8	Marche_Vid_T2	I0.7	marche vidange tompon 2
9	Arret_Vid_T2	I1.0	arret vidange tompon 2
10	Marche_Vid_T3	I1.1	marche vidange tompon 3
11	Arret_Vid_T3	I1.2	arret vidange tompon 3
12	Niveau_T1	AIW0	capteur niveau T1
13	Niveau_T2	AIW2	capteur niveau T2
14	Niveau_T3	AIW4	capteur niveau T3
15	Sys_ON	M0.0	etat systeme actif
16	P1	Q0.0	pompe a lobes
17	P2	Q0.1	pompe a engrenages
18	EV_Rem_T1	Q0.2	EV remplissage T1
19	EV_Rem_T2	Q0.3	EV remplissage T2
20	EV_Rem_T3	Q0.4	EV remplissage T3
21	EV_Vid_T1	Q0.5	EV vidage T1
22	EV_Vid_T2	Q0.6	EV vidage T2
23	EV_Vid_T3	Q0.7	EV vidage T3
24	Voy_Vert_Gen	Q1.0	Voyant vert general
25	Voy_auto	Q1.1	Voyant mode auto
26	Voy_Jaune_T1	Q1.2	Voyant Jaune T1
27	Voy_Rouge_T1	Q1.3	Voyant rouge T1
28	Voy_Jaune_T2	Q1.4	Voyant Jaune T2
29	Voy_Rouge_T2	Q1.5	Voyant rouge T2
30	Voy_Jaune_T3	Q1.6	Voyant jaune T3
31	Voy_Rouge_T3	Q1.7	Voyant rouge T3
32	Voy_Jaune_Res	Q2.0	Voyant Jaune reservoir
33	Voy_Rouge_Res	Q2.1	Voyant rouge reservoir

Figure 3.3: Table des mnémoniques associant les noms symboliques aux adresses physiques

3.3.3.2 Découpage fonctionnel du programme

Le programme est composé de vingt-trois réseaux, organisés en cinq groupes fonctionnels:

- **Gestion générale (Réseaux 1 et 2) :** marche et arrêt général du système, mise à 1 du bit d'état Sys_ON (M0.0) et activation du voyant vert général (Figure 3.4).

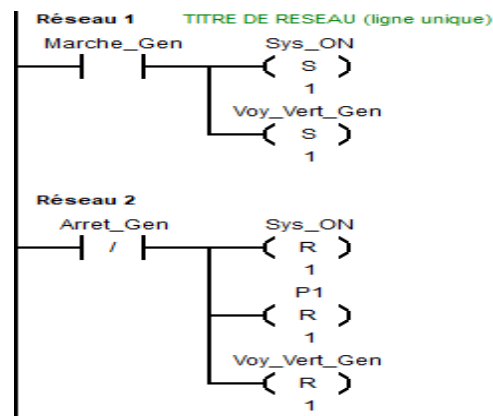


Figure 3.4: Réseaux de marche et d'arrêt général du système sous STEP 7-Micro/WIN

- **Commande de la pompe P1 (Réseaux 3 et 4) :** marche de P1 sur déclenchement du capteur de niveau bas du réservoir principal, et arrêt sur déclenchement du capteur de niveau haut (Figure 3.5).

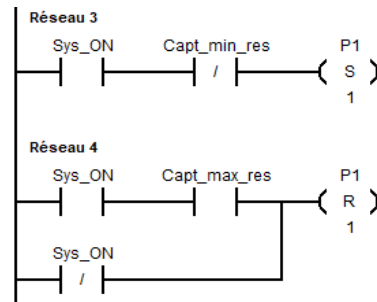


Figure 3.5: Réseaux de commande de la pompe1

- **Voyant mode automatique (Réseau 5) :** activation du voyant de mode automatique lorsque le sélecteur Auto est fermé (Figure 3.6).

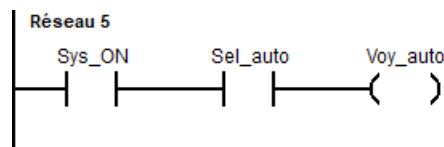
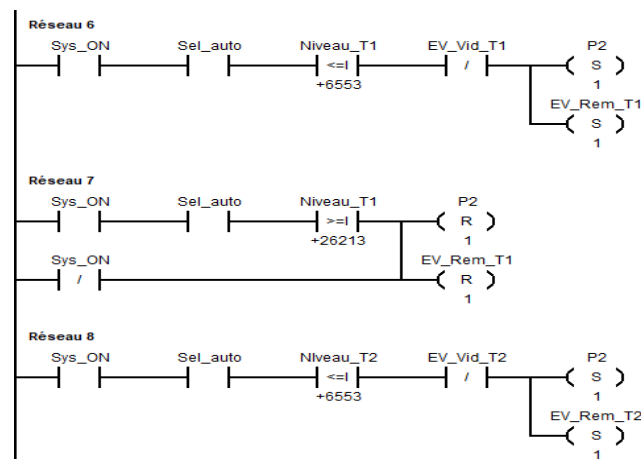


Figure 3.6: Réseaux d'activation de mode automatique

- **Gestion du remplissage des tampons (Réseaux 6 à 11) :** pour chaque tampon, un réseau commande l'ouverture de l'électrovanne de remplissage lorsque le niveau est inférieur au seuil bas, et un réseau commande sa fermeture lorsque le seuil haut est atteint. Un interverrouillage logique avec l'électrovanne de vidage est intégré (Figure 3.7).



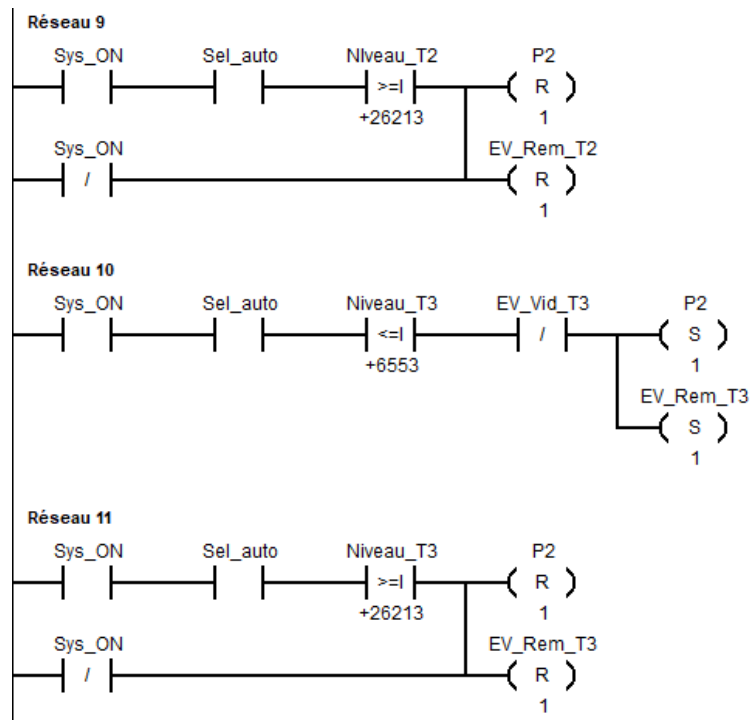
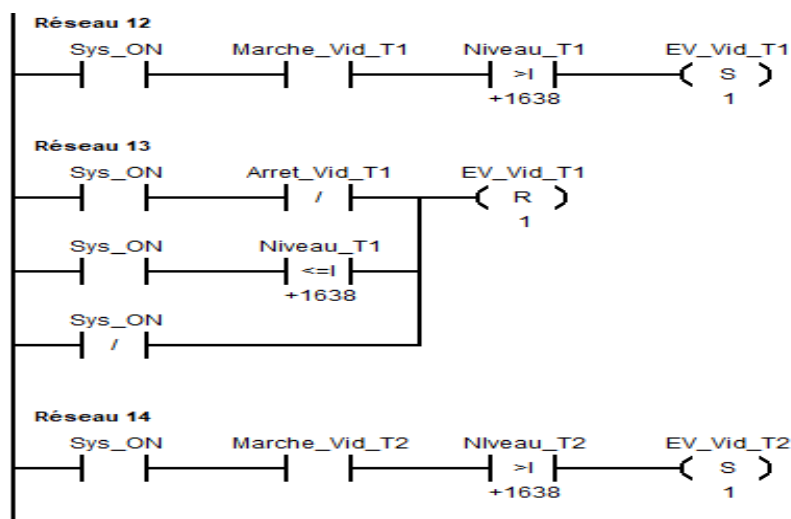


Figure 3.7: Réseaux de remplissage automatique

- **Gestion du vidage des tampons (Réseaux 12 à 17) :** pour chaque tampon, un réseau gère la marche du vidage par bouton-poussoir, et un réseau gère l'arrêt soit par bouton, soit automatiquement lorsque le niveau atteint le seuil minimum de sécurité (Figure 3.8).



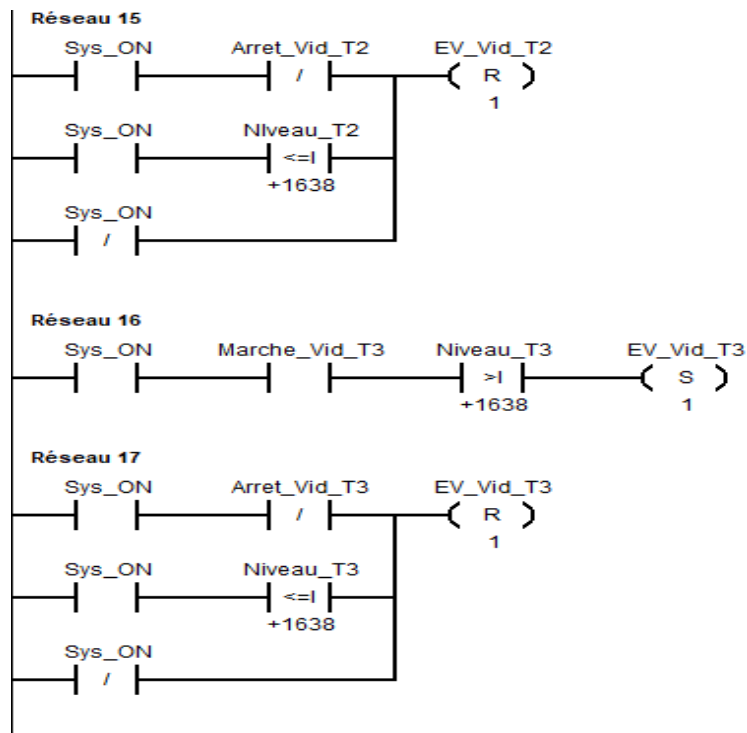
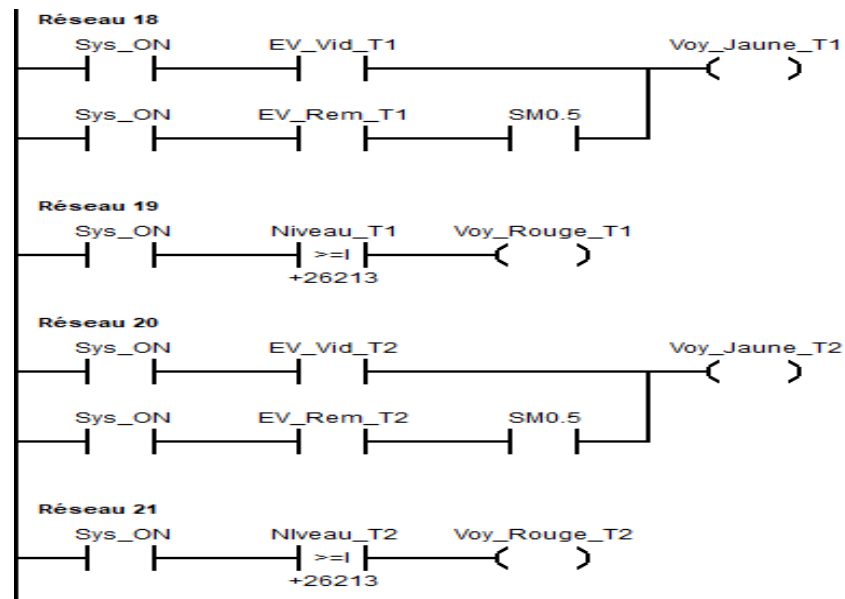


Figure 3.8: Réseaux de vidage

- **Voyants de signalisation (Réseaux 18 à 23) :** pour chaque tampon, un voyant jaune indique l'activité (remplissage ou vidage), avec clignotement à 1 Hz lors du remplissage automatique, et un voyant rouge indique que le tampon est plein (Figure 3.9).



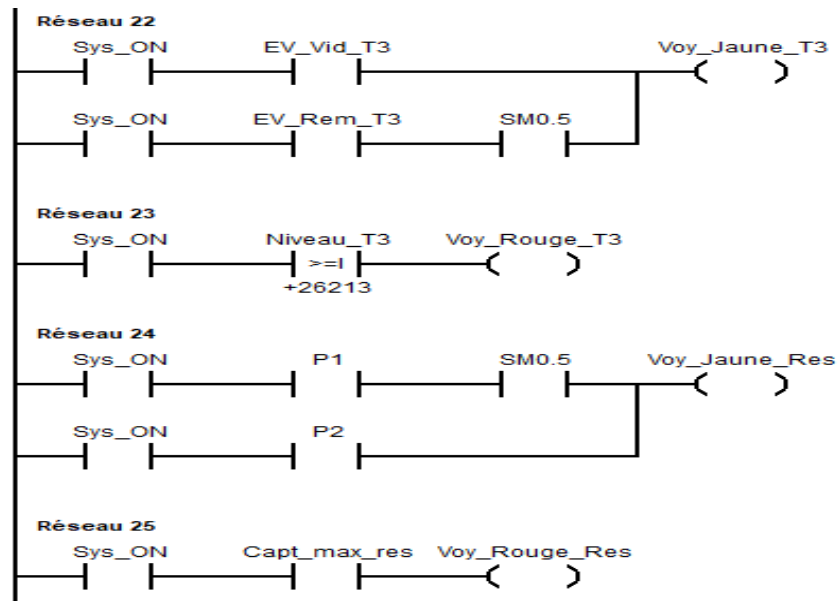


Figure 3.9: Réseaux de voyants de signalisation

3.3.3.3 Exploitation des entrées analogiques

Le module EM 231 convertit le courant 4-20 mA en une valeur numérique sur 16 bits, accessible aux adresses AIW0, AIW2 et AIW4 respectivement pour les tampons 1, 2 et 3. Trois seuils numériques ont été définis pour la gestion du procédé :

- **Seuil bas de remplissage (6 553) :** correspond approximativement à 20 % de la pleine échelle en dessous, le tampon est considéré comme nécessitant un remplissage.
- **Seuil haut de remplissage (26 213) :** correspond approximativement à 80 % de la pleine échelle au-dessus, le remplissage est arrêté et le voyant rouge s'active.
- **Seuil minimum de vidage (1 638) :** correspond approximativement à 5 % de la pleine échelle en dessous, l'électrovanne de vidage est automatiquement refermée pour éviter le désamorçage.

Ces seuils ont été choisis de manière à garantir une marge de sécurité suffisante par rapport aux valeurs extrêmes, tout en assurant une utilisation efficace de la capacité de stockage des tampons.

3.3.4 Développement du programme API

Dans cette partie nous détaillons les éléments-clés du programme développé, en mettant en lumière les principales structures logiques utilisées.

3.3.4.1 Marche et arrêt général

Le bit d'état Sys_ON (M0.0) est mis à 1 sur appui du bouton Marche_Gen (I0.0), ce qui active simultanément le voyant vert général. Le bouton Arrêt_Gen (I0.1), câblé en contact NF, remet à zéro l'ensemble des sorties (Sys_ON, P1, P2 et le voyant vert), garantissant ainsi un arrêt sûr du système.

3.3.4.2 Logique de remplissage avec inter-verrouillage

Pour chaque tampon, l'ouverture de l'électrovanne de remplissage est conditionnée par trois critères : le système est en marche (Sys_ON = 1), le niveau mesuré est inférieur au seuil bas ($AIW_x < 6553$), et l'électrovanne de vidage correspondante n'est pas active (contact NF de Q0.5/Q0.6/Q0.7). Ce dernier critère constitue un interverrouillage logique essentiel : il empêche tout conflit entre les phases de remplissage et de vidage, et garantit qu'à un instant donné, un même tampon ne peut être simultanément alimenté et vidé.

3.3.4.3 Logique de vidage avec arrêt automatique de sécurité

La marche du vidage est commandée par bouton-poussoir, mais le programme intègre un arrêt automatique lorsque le niveau dans le tampon atteint le seuil minimum de sécurité ($AIW_x \leq 1638$). Cette protection logicielle complète le bouton d'arrêt manuel et évite le désamorçage de la conduite de sortie, qui pourrait introduire de l'air dans le circuit et perturber la machine d'enrobage.

3.3.4.4 Signalisation lumineuse

Chaque tampon est associé à deux voyants : un voyant jaune et un voyant rouge. Le voyant jaune indique l'activité du tampon, avec une distinction logique selon le type d'opération : il s'allume en mode permanent lorsqu'un vidage est en cours, et clignote à la fréquence de 1 Hz lorsqu'un remplissage automatique est actif. Ce clignotement est obtenu grâce au bit système SM0.5, qui bascule automatiquement toutes les 500 ms. Le voyant rouge s'allume dès que le niveau atteint le seuil haut, signalant que le tampon est plein et que l'opérateur peut déclencher le vidage.

3.4 Simulation du programme sous PC-SIMU

Avant d'envisager toute implantation sur un automate physique, la validation du programme est réalisée par simulation. Cette étape permet de vérifier le bon comportement de la logique

programmée dans des conditions proches du réel, sans risque pour le matériel ni perturbation du procédé.

3.4.1 Environnement de simulation

La simulation s'appuie sur l'environnement combiné PC-SIMU (Figure 3.10) et S7-200 Simulator (Figure 3.11). PC-SIMU est un logiciel pédagogique qui permet de modéliser graphiquement une partie opérative (capteurs, actionneurs, voyants) et de la connecter à un simulateur d'automate. Le simulateur S7-200 reproduit le comportement réel du CPU 226 et exécute le programme téléchargé depuis STEP 7-Micro/WIN. Les modules d'extension EM 231 (entrées analogiques) et EM 222 (sorties TOR) sont également configurés dans le simulateur afin de reproduire fidèlement l'architecture matérielle prévue.

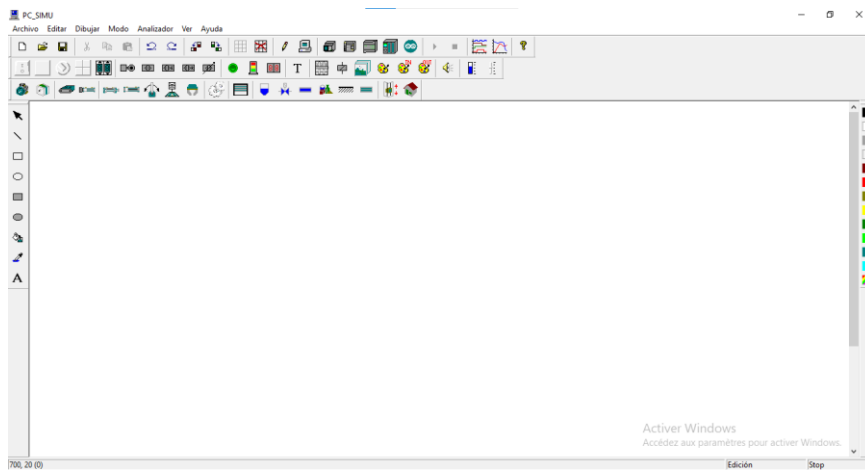


Figure 3.10: L'interface de logiciel PC-SIMU

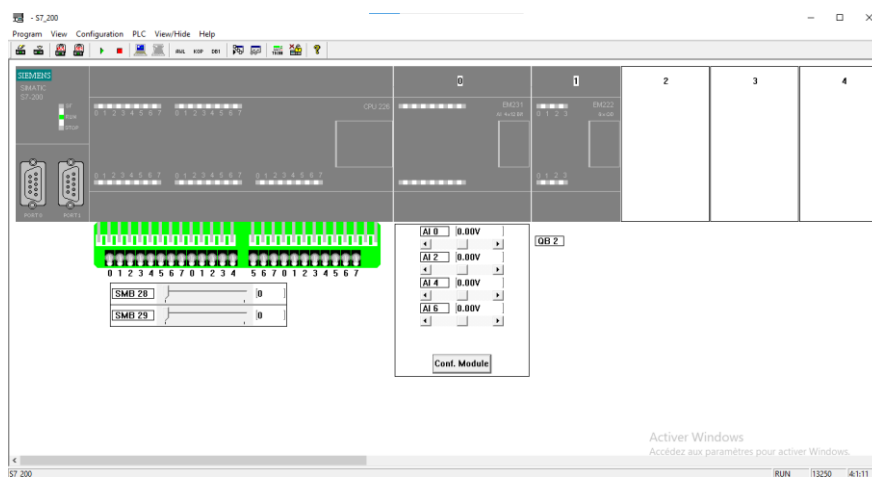


Figure 3.11: Simulateur de S7-200

3.4.2 Tests de fonctionnement

Une série de tests a été menée pour vérifier le comportement du programme face aux différents scénarios opérationnels. Chaque test est défini par un état initial, une action à exécuter et un résultat attendu.

3.4.2.1 Test 1 : Démarrage et arrêt général

La première séquence de tests concerne le démarrage et l'arrêt général du système. Lors de l'appui sur le bouton Marche_Gen, le bit Sys_ON passe à 1 et le voyant vert général s'allume. La pompe P1 démarre dès que le capteur de niveau bas du réservoir principal est actif. Lors de l'appui sur Arrêt_Gen, l'ensemble des sorties (Sys_ON, P1, P2, voyants) revient à zéro. Le comportement observé est conforme aux attentes.

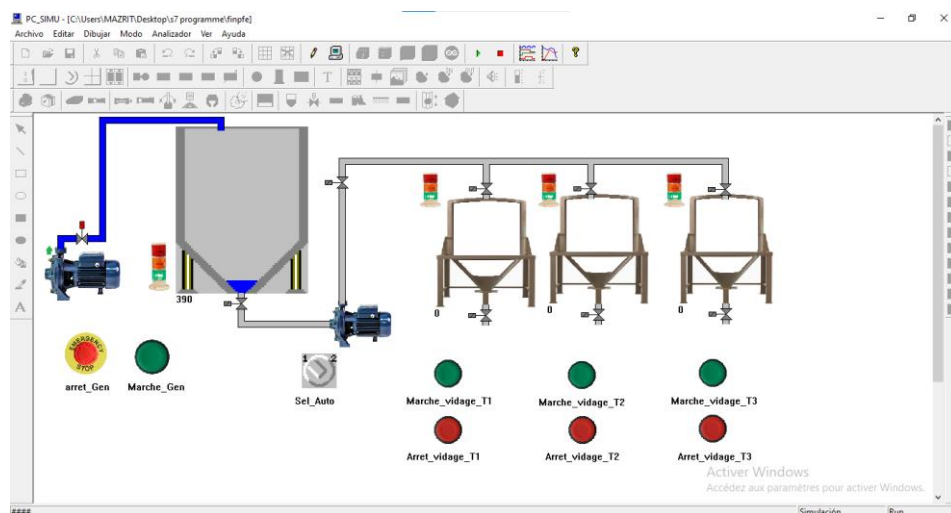


Figure 3.12: Activation du bouton Marche

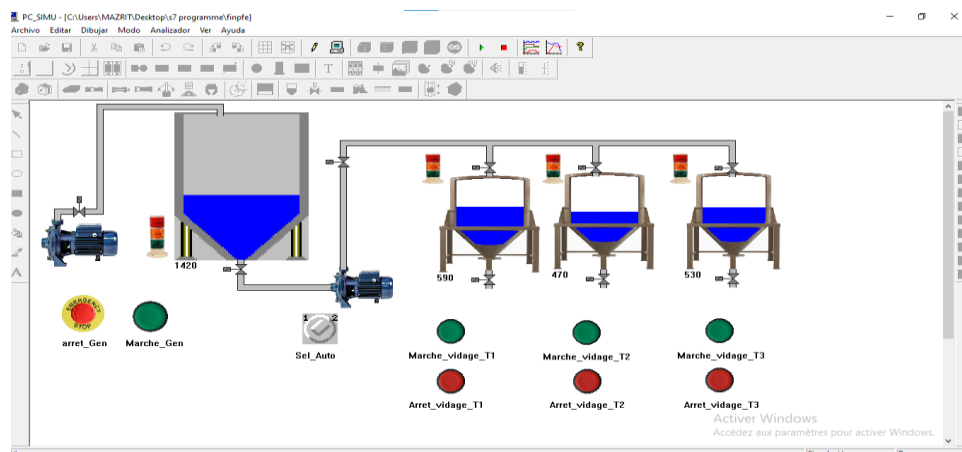


Figure 3.13: Arrêt général d'urgence

3.4.2.2 Test 2 : Remplissage automatique d'un tampon

Le sélecteur étant placé en mode automatique, on simule la décroissance du niveau du Tampon 1 en faisant varier la valeur de AIW0 (par exemple, on impose $AIW0 = 5\,000$, ce qui correspond à environ 15 % de la pleine échelle). Le programme déclenche alors l'ouverture de EV_Rem_T1 et la mise en marche de P2. La valeur de AIW0 est ensuite progressivement augmentée jusqu'à 27 000 (environ 82 %), ce qui provoque la fermeture de EV_Rem_T1 et l'extinction du voyant correspondant. Le voyant rouge du Tampon 1 s'allume bien lorsque le seuil haut est franchi.

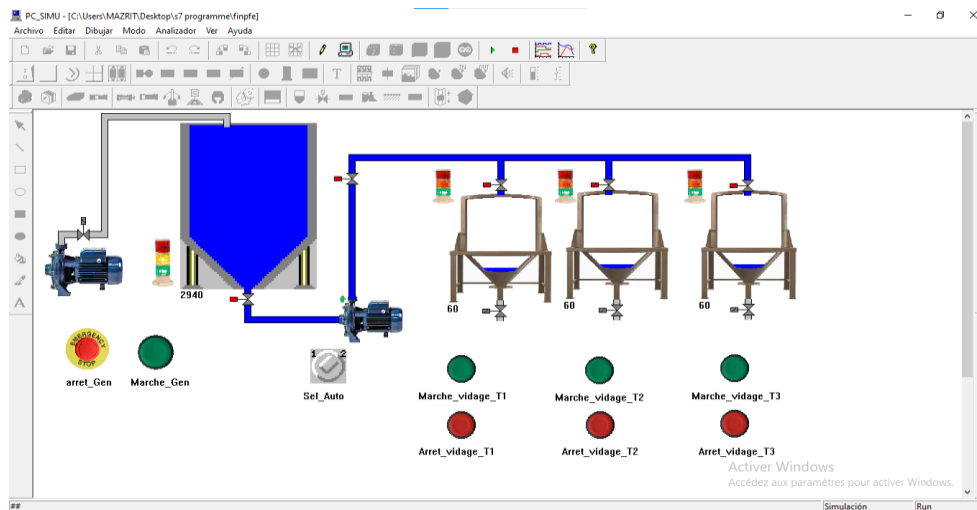


Figure 3.14: Activation du mode automatique

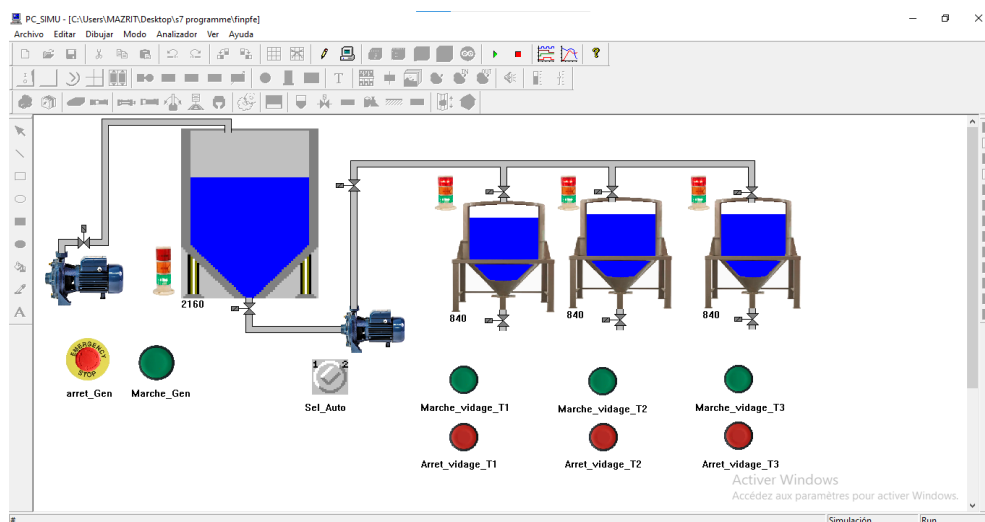


Figure 3.15 : Atteinte du seuil haut sur les tampons

3.4.2.3 Test 3 : Vidage manuelle avec arrêt de sécurité

On simule un tampon plein ($AIW1 \approx 30\,000$) et on appuie sur le bouton Marche_Vid_T2. L'électrovanne EV_Vid_T2 s'ouvre et le voyant jaune du Tampon 2 s'allume en mode permanent. On fait ensuite décroître progressivement la valeur de AIW2 jusqu'à 1 200 (environ 4 %), ce qui se situe en dessous du seuil minimum de sécurité. Le programme commande alors la fermeture automatique de EV_Vid_T2, validant ainsi le bon fonctionnement de la protection logicielle.

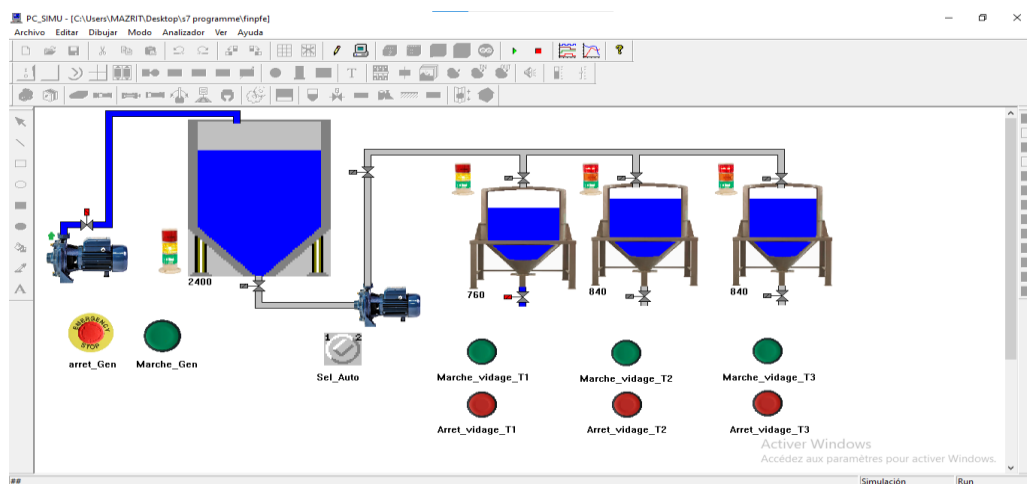


Figure 3.16: Vidage manuelle

3.4.2.4 Test 4 : Interverrouillage entre remplissage et vidage

Pour vérifier l'interverrouillage, on force l'ouverture de EV_Vid_T1 puis on simule une décroissance du niveau du Tampon 1 sous le seuil bas. Le programme ne commande pas l'ouverture de EV_Rem_T1, démontrant que l'interverrouillage logique est bien actif. Lorsque le vidage est arrêté, le remplissage peut alors démarrer normalement.

3.4.4 Analyse des résultats et conformité au cahier des charges

L'ensemble des tests réalisés sous PC-SIMU a permis de valider chaque fonctionnalité prévue dans le cahier des charges. Le tableau 3.4 récapitule les exigences et leur niveau de conformité.

Exigence du cahier des charges	Élément validé	Conformité
Automatisation du remplissage des tampons	Réseaux 6 à 11 + Test 2	✓ Validée
Surveillance continue des niveaux	Capteurs O1D100 + EM 231	✓ Validée
Coordination pompes et électrovannes	Réseaux 3, 4, 6 à 11	✓ Validée
Modes automatique / manuel	Sélecteur I0.4 + Réseaux 5 et 12 à 17	✓ Validée
Arrêt général d'urgence	Bouton I0.1 + Réseau 2	✓ Validée
Interverrouillage remplissage / vidage	Contact NF dans Réseaux 6, 8, 10 + Test 4	✓ Validée
Arrêt automatique de sécurité au vidage	Comparateur AIW ≤ 1638 + Test 3	✓ Validée
Signalisation lumineuse complète	Réseaux 18 à 23	✓ Validée

Tableau 3-4 : Conformité du système au cahier des charges

L'ensemble des exigences exprimées dans le cahier des charges est satisfait par la solution proposée. Les tests menés sous l'environnement de simulation ont permis de vérifier non seulement la logique fonctionnelle, mais aussi la robustesse du système face à des situations particulières : remplissage simultané de plusieurs tampons, tentative d'ouverture d'une électrovanne de remplissage alors que le vidage est actif, atteinte du seuil minimum lors d'un vidage prolongé. Dans tous les cas, le comportement observé correspond à celui attendu.

Au-delà de la conformité strictement fonctionnelle, l'apport qualitatif du système automatisé est significatif : la suppression des manipulations répétitives par l'opérateur, la réduction du risque d'erreur humaine, la possibilité d'évolution future (ajout de tampons supplémentaires, intégration de fonctions de comptage de production) constituent autant d'avantages par rapport à l'installation à logique câblée d'origine.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté la démarche complète de conception et d'implémentation du système automatisé proposé pour l'installation de remplissage de chocolat. Partant du cahier des charges formalisées à partir de l'analyse fonctionnelle, nous avons identifié les entrées et sorties nécessaires, sélectionné les composants matériels appropriés et développé le programme de commande sous STEP 7-Micro/WIN. La validation par simulation sous PC-SIMU a permis de confirmer la conformité de la solution aux exigences exprimées.

Le choix de l'automate Siemens S7-200 CPU 226, associé au module d'entrées analogiques EM 231, s'est révélé parfaitement adapté à la taille et à la nature du procédé étudié. L'utilisation de capteurs laser de distance pour la mesure continue du niveau des tampons offre une précision et une fiabilité supérieures à celles d'un système à seuils discrets. La structuration du programme en vingt-trois réseaux modulaires, basée sur des mnémoniques explicites, facilite la lecture, la maintenance et l'évolution future du système.

L'ensemble des tests effectués confirme la pertinence des choix réalisés et la robustesse de la solution implémentée. Le système est désormais prêt pour une mise en service réelle sur l'installation industrielle, étape qui constituera la prochaine phase de déploiement

Chapitre 4

Supervision du système de contrôle étudié

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la conception et la programmation du système automatisé ; ce chapitre est consacré à la mise en œuvre de l'interface de supervision. Dans une installation industrielle moderne, la supervision est le complément indispensable de l'automate programmable : elle permet le dialogue entre l'opérateur et le procédé, visualise l'état du système, commande les organes principaux et réagit rapidement aux situations anormales.

La supervision industrielle fait partie des systèmes SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) dont le but est d'acquérir les données du procédé, de les présenter à l'opérateur sous une forme exploitable et d'enregistrer les événements significatifs [2]. La supervision, dans le cadre de notre usine de remplissage de chocolat, remplit une fonction bien précise : elle se substitue à la consultation directe de l'état du système (via les boutons et voyants physiques) par une visualisation centralisée et dynamique du processus.

Ce chapitre détaille successivement le logiciel de développement utilisé, la création et la configuration du projet de supervision, la conception graphique des vues, la validation du fonctionnement par simulation. Les choix techniques sont systématiquement reliés aux exigences exprimées dans le cahier des charges présenté au chapitre précédent.

4.2 Logiciel de développement du système de supervision

4.2.1 Présentation de WinCC flexible 2008

Le logiciel retenu pour le développement de l'interface de supervision est **SIMATIC WinCC flexible 2008**, édité par Siemens AG [13]. Ce logiciel constitue la solution standard de la famille SIMATIC pour la conception d'interfaces homme-machine destinées aux pupitres opérateurs Siemens, ainsi qu'aux applications fonctionnant directement sur PC sous Runtime. Il s'intègre naturellement avec les automates de la gamme SIMATIC, notamment le S7-200 utilisé dans notre installation [15].

WinCC flexible se présente sous forme d'un environnement de développement intégré (EDI) permettant de créer un projet complet de supervision : configuration du pupitre, définition des liaisons avec l'automate, déclaration des variables, conception des vues graphiques, gestion des alarmes et des recettes, et déploiement sur la cible. La version 2008 utilisée correspond à l'édition Advanced, qui supporte le déploiement sur PC sous environnement Windows.

4.2.2 Architecture du logiciel

L'architecture de WinCC flexible repose sur deux composants principaux :

- **L'éditeur de projet (Engineering) :** interface de développement où l'on construit les vues, déclare les variables, configure les liaisons et définit les comportements dynamiques. C'est dans cet éditeur que l'ensemble de la conception est réalisé (Figure 4.1).
- **Le Runtime :** moteur d'exécution qui anime le projet déployé. Le Runtime lit en continu les valeurs des variables, met à jour l'affichage et transmet les commandes de l'opérateur vers l'automate.

Ce découpage entre la phase de conception et la phase d'exécution est conforme aux pratiques modernes du génie automatique : la configuration est figée à la fin du développement, et l'application s'exécute ensuite de manière déterministe [15].

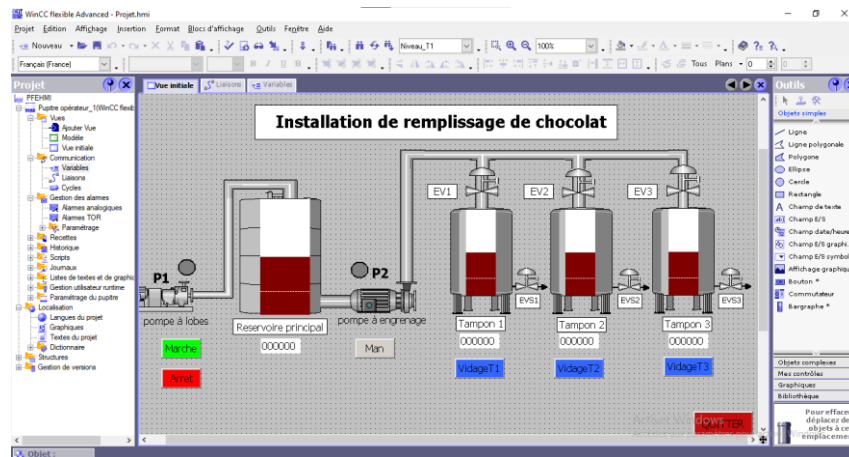


Figure 4.1: Vue de l'éditeur WinCC flexible 2008 Advanced

4.2.3 Communication avec l'automate

WinCC flexible supporte plusieurs protocoles de communication, choisis en fonction de l'automate cible et de l'infrastructure réseau. Pour le SIMATIC S7-200, le protocole standard est le PPI (Point-to-Point Interface), basé sur une liaison série RS-485 et caractérisé par sa simplicité de mise en œuvre [12]. D'autres protocoles, tels que MPI ou Ethernet TCP/IP, sont également disponibles pour les automates de gammes supérieures.

Dans le cadre de notre projet, la liaison configurée est de type PPI à un débit de 187 500 bauds, paramétrée pour communiquer avec le CPU 226 à l'adresse de station 2. Cette configuration correspond aux valeurs par défaut recommandées par Siemens pour les applications de taille moyenne.

4.3 Création et configuration de l'HMI

4.3.1 Création du projet

La création du projet de supervision suit une démarche structurée. La première étape consiste à lancer WinCC flexible et à créer un nouveau projet, auquel nous avons attribué le nom PFEHMI. Lors de la création, l'environnement demande de spécifier le pupitre opérateur cible. Notre choix s'est porté sur un pupitre de type PC Runtime (Pupitre opérateur_1 WinCC flexible Runtime), qui permet d'exécuter l'interface directement sur un poste informatique.

Ce choix présente plusieurs avantages : il évite l'investissement dans un pupitre matériel dédié, il facilite la phase de développement et de validation, et il s'intègre parfaitement à l'architecture de simulation présentée au chapitre précédent. Pour un déploiement industriel ultérieur, le projet pourra être adapté à un pupitre Siemens de la gamme TP ou MP.

4.3.2 Configuration de la liaison de communication

La configuration de la liaison entre l'IHM et l'automate s'effectue dans l'éditeur Liaisons. Une liaison nommée Liaison_1 a été créée avec les paramètres suivants :

- **Pilote de communication** : SIMATIC S7 200
- **Interface** : MPI/DP
- **Profil de réseau** : PPI
- **Débit** : 187 500 bauds
- **Adresse du pupitre** : 1
- **Adresse de l'automate** : 2

Ces paramètres garantissent une communication fiable entre l'interface et le CPU 226. Le débit de 187 500 bauds est compatible avec la cadence d'acquisition des variables, fixée à 100 ms pour assurer une réactivité élevée de l'affichage (Figure 4.2).

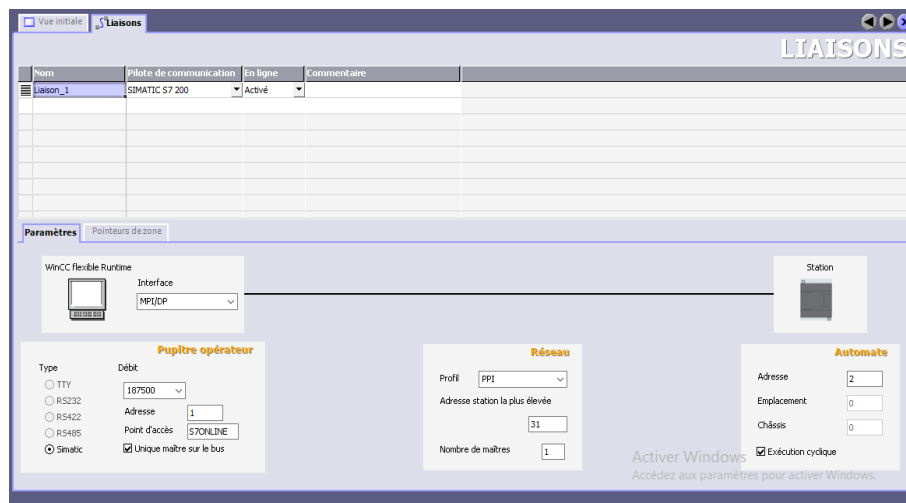


Figure 4.2: Configuration de liaison dans WinCC flexible

4.3.3 Définition des variables de supervision

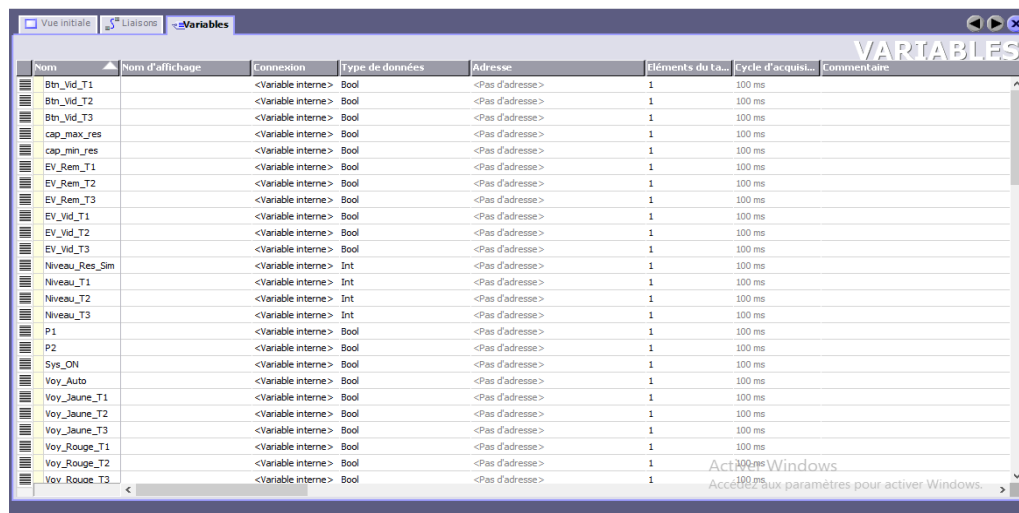
Les variables constituent le pont entre l'automate et l'interface graphique. Dans WinCC flexible, chaque variable est associée à une adresse mémoire de l'automate ou bien définie comme variable interne, traitée localement par le Runtime. Pour notre projet, l'ensemble des variables a été configuré en mode interne, ce qui permet de valider le comportement de l'IHM indépendamment d'un automate physique tout en conservant la cohérence des noms symboliques avec le programme PLC.

Au total, vingt-deux variables ont été déclarées, réparties selon les groupes suivants :

Groupe	Type	Variables
Niveaux des tampons	Int	Niveau_T1, Niveau_T2, Niveau_T3
Réservoir principal (TOR)	Bool	Cap_Min_Res, Cap_Max_Res
Pompes	Bool	P1, P2
Électrovannes remplissage	Bool	EV_Rem_T1, EV_Rem_T2, EV_Rem_T3
Électrovannes vidage	Bool	EV_Vid_T1, EV_Vid_T2, EV_Vid_T3
État système et mode	Bool	Sys_ON, Voy_Auto
Voyants des tampons	Bool	Voy_Jaune_T1/T2/T3, Voy_Rouge_T1/T2/T3

Tableau 4.1: Groupes de variables configurées dans l'IHM

Chaque variable est paramétrée avec un cycle d'acquisition de 100 ms, conforme aux exigences de réactivité du procédé. Cette cadence garantit une mise à jour fluide des affichages sans surcharger le système.



Nom	Nom d'affichage	Connexion	Type de données	Adresse	Éléments du ta...	Cycle d'acquist...	Commentaire
Btn_Vid_T1		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Btn_Vid_T2		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Btn_Vid_T3		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
cap_max_res		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
cap_min_res		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
EV_Rem_T1		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
EV_Rem_T2		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
EV_Rem_T3		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
EV_Vid_T1		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
EV_Vid_T2		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
EV_Vid_T3		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Niveau_Res_Sim		<Variable interne>	Int	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Niveau_T1		<Variable interne>	Int	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Niveau_T2		<Variable interne>	Int	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Niveau_T3		<Variable interne>	Int	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
P1		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
P2		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Sys_ON		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Auto		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Jaune_T1		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Jaune_T2		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Jaune_T3		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Rouge_T1		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Rouge_T2		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	
Voy_Rouge_T3		<Variable interne>	Bool	<Pas d'adresse>	1	100 ms	

Figure 4.3: Liste des variables configurées dans le projet de supervision

4.4 Conception des différentes vues du projet

L'organisation visuelle du projet repose sur une vue principale qui regroupe l'ensemble des éléments graphiques nécessaires à la conduite du procédé. Cette section présente la démarche de conception et les éléments constitutifs du synoptique.

4.4.1 Structure et organisation des vues

WinCC flexible organise les vues d'un projet selon une hiérarchie simple : la Vue initiale (vue de démarrage) s'affiche à l'ouverture du Runtime, et un Modèle (template) peut être appliqué à plusieurs vues afin de partager des éléments communs comme le titre, le bandeau ou les boutons de navigation [15]. La complexité fonctionnelle est suffisamment maîtrisée, dans notre installation, par une vue unique regroupant le synoptique du procédé et le pupitre de commande.

Ce choix d'une vue unique se justifie pour plusieurs raisons. D'abord, le procédé est compact : un réservoir principal, deux pompes, trois tampons et leurs électrovannes associées. Ensuite, l'opérateur doit pouvoir surveiller l'ensemble du procédé sans navigation entre plusieurs écrans, ce qui réduit le temps de réaction en cas d'anomalie. Enfin, cette approche reste cohérente avec les bonnes pratiques de conception ergonomique des interfaces de supervision, qui recommandent de privilégier la concentration de l'information utile sur une seule vue lorsque cela est possible.

4.4.2 Conception du synoptique

Le synoptique reproduit graphiquement l'architecture physique de l'installation. Sa conception a été guidée par un principe de lisibilité immédiate : tout opérateur familier du procédé doit pouvoir identifier les organes principaux sans formation préalable. Les éléments suivants ont été représentés :

- **Le réservoir principal** : représenté par une cuve cylindrique placée à gauche du synoptique, avec son repère textuel.
- **Les pompes P1 et P2** : représentées chacune par une icône industrielle distincte (pompe à lobes pour P1, pompe à engrenages pour P2), avec leur repère et le nom de leur fonction.
- **Les trois tampons** : représentés par des cuves cylindriques verticales équipées chacune d'un bargraphe dynamique reflétant le niveau mesuré.
- **Les électrovannes** : trois électrovannes de remplissage (EV1, EV2, EV3) placées au-dessus des tampons et trois électrovannes de vidage (EVS1, EVS2, EVS3) placées en sortie latérale de chaque tampon. Chaque vanne est repérée par une étiquette.
- **La tuyauterie** : représentée par des lignes reliant logiquement les différents organes selon le sens de circulation du chocolat.

Les éléments graphiques utilisés proviennent de la bibliothèque intégrée à WinCC flexible, complétée par les objets standards (rectangles, lignes, ellipses, champs de texte). L'utilisation de cette bibliothèque garantit un rendu professionnel et conforme aux standards industriels (Figure 4.4).

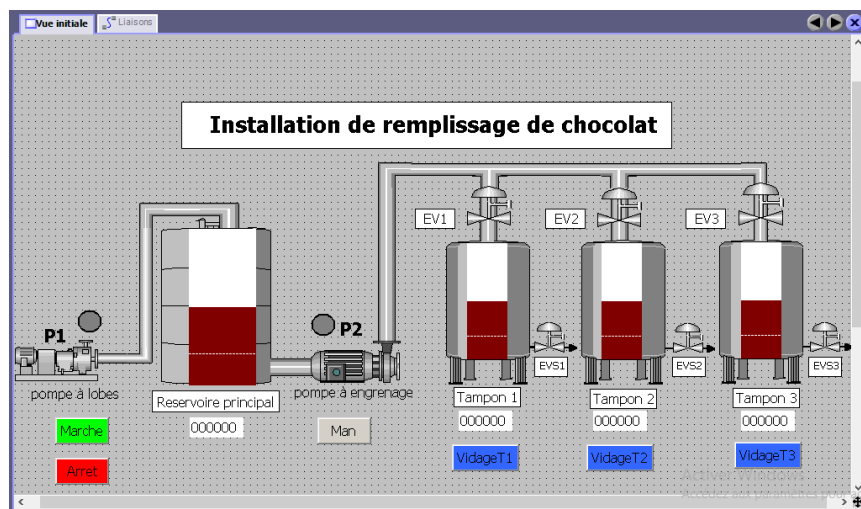


Figure 4.4: Synoptique de l'installation dans l'éditeur WinCC flexible

4.4.3 Animations dynamiques

Au-delà de la représentation statique, le synoptique intègre plusieurs animations dynamiques qui transforment chaque élément graphique en un indicateur d'état temps réel. Trois mécanismes d'animation ont été exploités :

4.4.3.1 Bargraphes des tampons

Chaque tampon est équipé d'un bargraphe vertical positionné à l'intérieur de sa représentation graphique. L'élément Bargraphe est paramétré avec la variable de processus correspondante (Niveau_T1, Niveau_T2 ou Niveau_T3) et une échelle allant de 0 à 32 767, conforme à la résolution du module d'entrées analogiques EM 231. Le remplissage visuel du bargraphe évolue proportionnellement à la valeur lue, offrant une perception immédiate du niveau de chocolat dans chaque tampon (Figure 4.5).

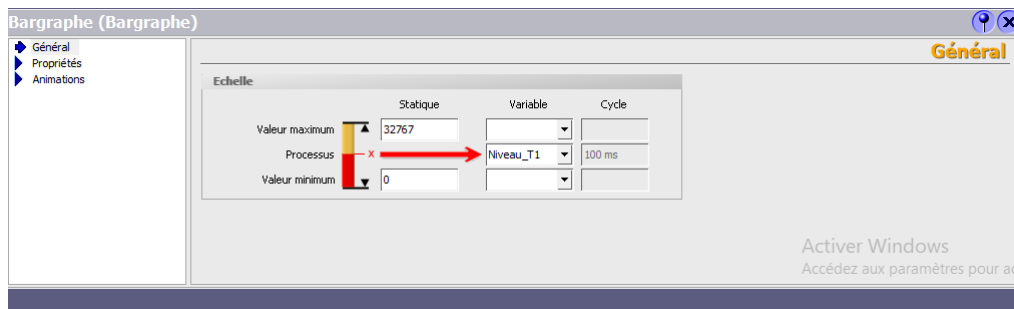


Figure 4.5: Configuration de l'échelle et de la variable d'un bargraphe

4.4.3.2 Indicateurs des pompes

Pour signaler l'état de marche ou d'arrêt des deux pompes, deux indicateurs circulaires (Ellipses) ont été placés à proximité de chaque pompe. L'animation de représentation associe la variable de l'état (P1 ou P2) à la couleur de l'indicateur : gris lorsque la pompe est à l'arrêt, vert lorsqu'elle est en marche. Ce repère visuel, conforme aux conventions de couleur standard dans l'industrie, permet à l'opérateur de vérifier d'un coup d'œil l'état du système d'entraînement.

4.4.3.3 Étiquettes dynamiques des électrovannes

Pour les six électrovannes, plutôt que d'ajouter des indicateurs séparés, l'animation a été appliquée directement à l'étiquette de chaque vanne. Lorsque l'électrovanne est fermée, son étiquette apparaît sur fond gris ; lorsque l'électrovanne est ouverte, l'arrière-plan change de couleur. Pour différencier les deux familles d'électrovannes, une convention chromatique a été adoptée :

- **Électrovannes de remplissage (EV1, EV2, EV3) :** arrière-plan orange lorsqu'elles sont ouvertes.
- **Électrovannes de vidage (EVS1, EVS2, EVS3) :** arrière-plan bleu lorsqu'elles sont ouvertes.

Cette différenciation chromatique facilite la distinction visuelle des phases du procédé et améliore l'ergonomie globale de l'interface.

4.4.4 Organes de commande

Le pupitre de commande, intégré à la même vue, regroupe les boutons et le commutateur nécessaires à l'exploitation. Chaque organe est associé à un événement déclenchant l'exécution d'une ou plusieurs fonctions agissant sur les variables internes :

Organe	Type	Action
Marche	Bouton	PositionnerBit sur Sys_ON et P1
Arrêt	Bouton	RAZBit sur l'ensemble des sorties
Auto / Man	Commutateur	Activation/désactivation de P2, EV_Rem_T1/T2/T3 et Voy_Auto
VidageT1, T2, T3	Bouton	InverserBit sur EV_Vid_T1, T2 ou T3 (bascule)
Quitter	Bouton	Fermeture du Runtime

Tableau 4-2 : : Organes de commande de l'IHM et fonctions associées

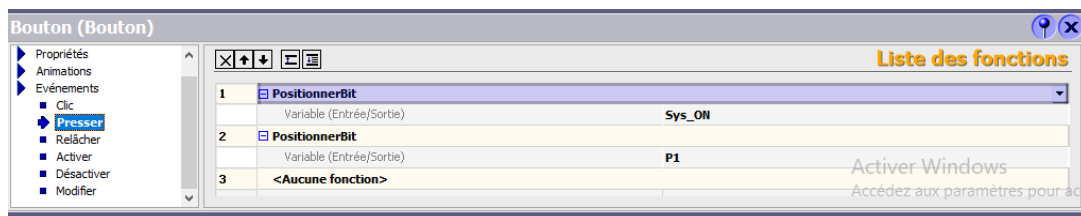


Figure 4.6: Liste des fonctions associées à l'événement Presser du bouton Marche

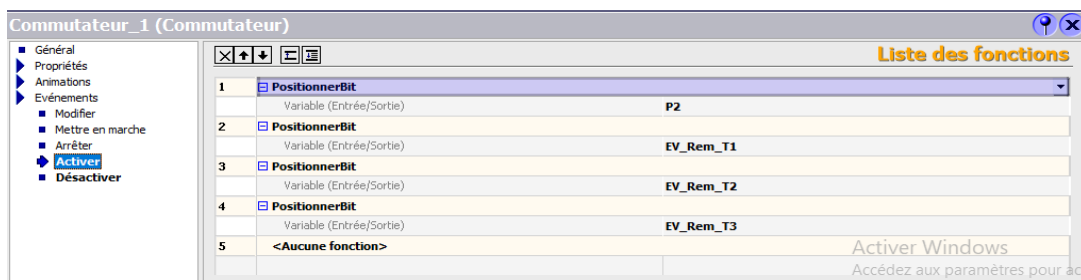


Figure 4.7: Fonctions associées à l'événement Activer du commutateur Auto/Man

4.6 Simulation du système

La validation de l'interface de supervision a été conduite en mode Runtime, le moteur d'exécution de WinCC flexible. Cette simulation permet de vérifier le comportement complet de l'IHM dans des conditions proches du déploiement réel : interaction de l'opérateur avec les boutons, mise à jour dynamique des bargraphes et des indicateurs, et cohérence des animations.

4.6.1 Démarrage du Runtime

Le démarrage du Runtime est commandé depuis l'éditeur par la fonction Démarrer le runtime avec le simulateur. À l'ouverture, l'interface s'affiche en mode plein écran avec l'ensemble des éléments graphiques à leur état initial : bargraphes vides, indicateurs des pompes en gris, étiquettes des électrovannes sur fond gris. Tous les boutons sont disponibles et prêts à réagir aux actions de l'opérateur (Figure 4.8).

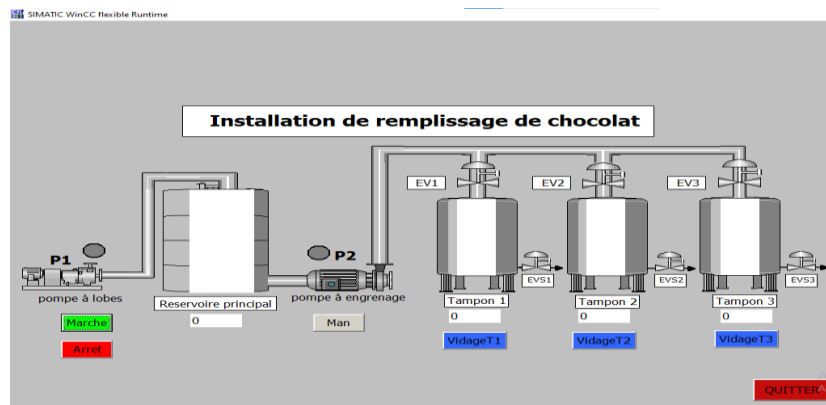


Figure 4.8: Vue de l'IHM en mode Runtime à l'état initial

4.6.2 Scénarios de test

Plusieurs scénarios représentatifs du fonctionnement quotidien de l'installation ont été simulés pour valider le comportement de l'interface.

4.6.2.1 Scénario 1 : Démarrage du système

L'opérateur appuie sur le bouton Marche. Les variables Sys_ON et P1 passent à l'état 1, ce qui déclenche immédiatement l'allumage de l'indicateur vert situé près de la pompe P1. L'ensemble du reste du synoptique demeure dans son état initial, conforme à la logique du programme : la pompe P2 et les électrovannes de remplissage ne sont activées qu'en mode automatique (Figure 4.9).

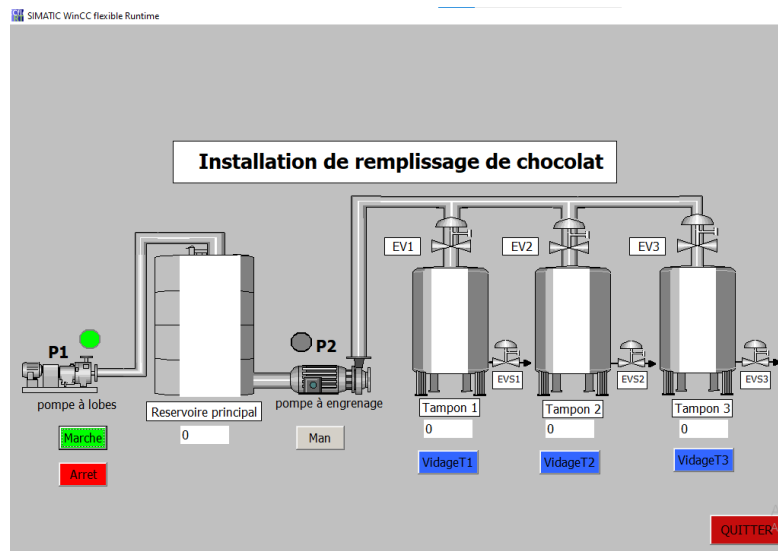


Figure 4.9: Activation de la pompe P1 sur appui du bouton Marche

4.6.2.2 Scénario 2 : Passage en mode automatique

Le commutateur est placé en position Auto. Cette action déclenche les fonctions suivantes : La variable Voy_Auto passe à 1, la pompe P2 est mise en marche, et les trois électrovannes de remplissage EV_Rem_T1, EV_Rem_T2 et EV_Rem_T3 sont ouvertes. Sur l'interface, le commutateur Auto change de couleur, l'indicateur vert de la pompe P2 s'active, et les trois étiquettes EV1, EV2 et EV3 passent sur fond orange, signalant le remplissage en cours (Figure 4.10).

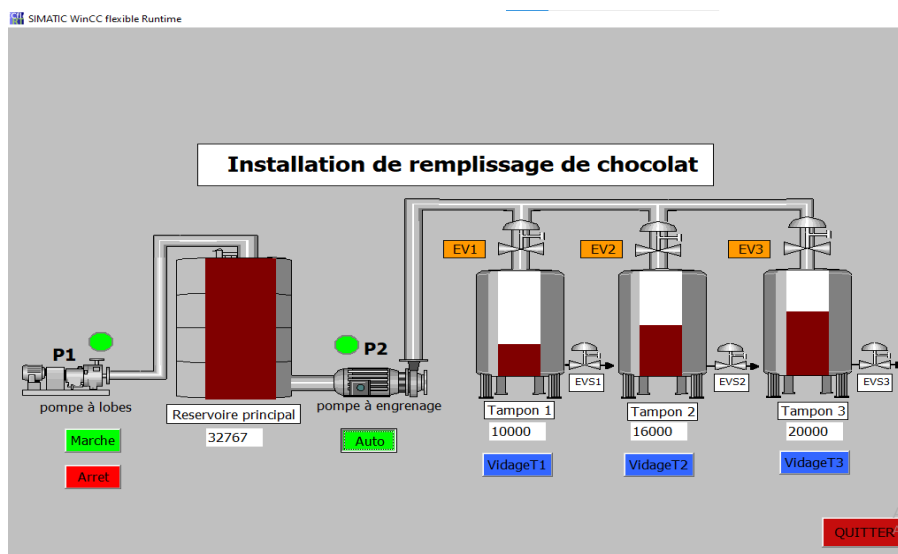


Figure 4.10 : Activation du mode automatique : pompe P2 et électrovannes de remplissage en marche

4.6.2.3 Scénario 3 : Simulation des niveaux

Pour reproduire le comportement dynamique du procédé, des champs d'entrée/sortie associés aux variables Niveau_T1, Niveau_T2 et Niveau_T3 permettent à l'utilisateur de modifier manuellement les valeurs des niveaux. En faisant varier ces valeurs (par exemple 10 000 pour le Tampon 1, 16 000 pour le Tampon 2 et 20 000 pour le Tampon 3), les bargraphes correspondants évoluent en temps réel, démontrant la fluidité du lien entre les variables et l'affichage graphique (Figure 4.11).

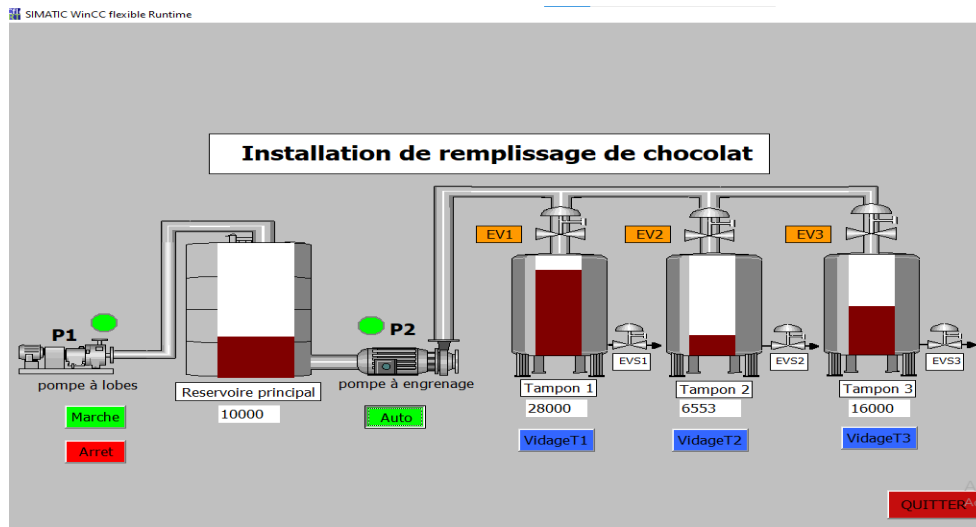


Figure 4.11: Visualisation simultanée de niveaux différents dans les trois tampons

4.6.2.4 Scénario 4 : Commande de vidage

L'opérateur appuie sur le bouton VidageT1. La variable EV_Vid_T1 bascule à 1, ce qui fait passer l'étiquette EVS1 sur fond bleu. Ce changement chromatique signale immédiatement à l'opérateur que la vanne de sortie du Tampon 1 est ouverte et que le chocolat s'écoule vers la machine d'enrobage. Un appui ultérieur sur le même bouton remet EV_Vid_T1 à 0 et referme la vanne (Figure 4.12).

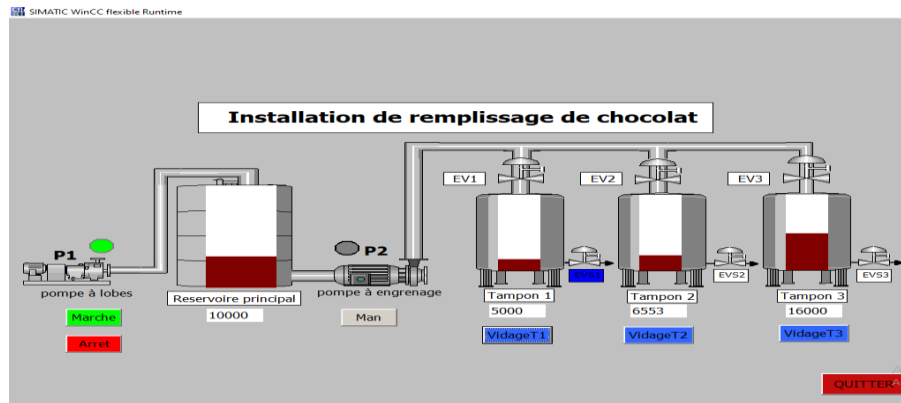


Figure 4.12: Commande manuelle du vidage : l'étiquette EVS1 passe sur fond bleu

4.6.2.5 Scénario 5 : Arrêt général

L'opérateur appuie sur le bouton Arrêt. Toutes les variables liées aux pompes, aux électrovannes et aux voyants reviennent à zéro. Sur l'interface, les indicateurs des pompes redeviennent gris, les étiquettes des électrovannes reprennent leur couleur d'arrière-plan neutre, et le commutateur Auto revient en position Man. Les bargraphes des tampons conservent leur dernière valeur, ce qui reflète le fait que les niveaux physiques ne sont pas modifiés par l'arrêt des commandes (Figure 4.13).

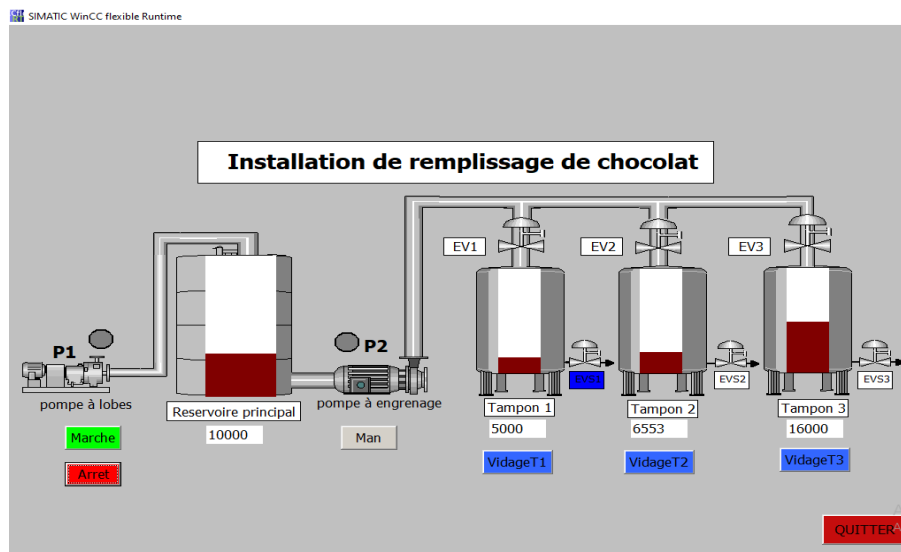


Figure 4.12: Retour à l'état initial après commande d'arrêt général

4.6.3 Analyse des résultats

L'ensemble des scénarios simulés a permis de valider la cohérence du comportement de l'IHM avec la logique attendue. Les principales observations sont les suivantes :

- **Réactivité de l'affichage** : le cycle d'acquisition de 100 ms se traduit par une mise à jour pratiquement instantanée de tous les indicateurs et bargraphes.

- **Cohérence visuelle** : le code couleur adopté (vert/orange/bleu/gris) permet une lecture intuitive de l'état du procédé sans recourir à un manuel explicatif.
- **Ergonomie des commandes** : le regroupement des boutons dans la partie inférieure de la vue et le placement des indicateurs à proximité des éléments concernés réduit la fatigue visuelle de l'opérateur.
- **Robustesse fonctionnelle** : les actions effectuées en séquence (Marche, Auto, Vidage, Arrêt) produisent dans tous les cas le comportement attendu, sans incohérence ni état figé.

L'interface de supervision développée répond ainsi à l'ensemble des exigences exprimées dans le cahier des charges. Elle constitue le complément indispensable de l'automate, offrant à l'opérateur une vue centralisée et dynamique du procédé.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté la démarche complète de conception et de mise en œuvre de l'interface de supervision pour notre installation de remplissage de chocolat. Le choix du logiciel SIMATIC WinCC flexible 2008, naturellement compatible avec l'automate S7-200, a permis de développer une interface cohérente avec l'architecture matérielle retenue. La création du projet, la configuration de la liaison PPI et la déclaration des variables ont constitué les fondations sur lesquelles s'appuie l'ensemble de la conception graphique.

La vue principale, conçue comme un synoptique unique regroupant le procédé et le pupitre de commande, reproduit fidèlement l'architecture de l'installation tout en intégrant les éléments interactifs nécessaires à son exploitation. Les animations dynamiques bargraphes des tampons, indicateurs des pompes, couleurs des étiquettes d'électrovannes transforment l'image statique en une représentation vivante du procédé, où chaque changement d'état est immédiatement perceptible.

Les tests menés en mode Runtime ont confirmé la conformité de l'interface aux objectifs fixés. Les différents scénarios simulés démarrage, passage en mode automatique, variation des niveaux, commande de vidage et arrêt général ont produit dans tous les cas le comportement attendu, validant l'ensemble de la chaîne fonctionnelle, depuis l'événement opérateur jusqu'à la mise à jour visuelle.

L'interface développée pourra ultérieurement être enrichie par l'ajout d'un système d'alarmes structuré, par l'enregistrement d'un historique de production ou encore par l'intégration de vues spécialisées dédiées à la maintenance ou à la traçabilité. Ces évolutions, qui exploiteraient pleinement les fonctionnalités étendues de WinCC flexible, constituent des perspectives naturelles pour les prolongements de ce travail.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire vise l'automatisation et la supervision à distance d'une installation de remplissage de chocolat, qui reste jusqu'à présent commandée par une logique entièrement câblée.

Nous avons d'abord rappelé les notions fondamentales relatives aux systèmes automatisés et aux automates programmables industriels, avant d'analyser l'installation existante. Cette analyse a révélé le caractère rudimentaire de la commande manuelle : absence de régulation de

niveau, dépendance vis-à-vis de l'opérateur, rigidité du câblage et impossibilité de toute supervision. Autant de constats qui ont justifié la migration vers une solution programmée.

Sur cette base, nous avons conçu et mis en œuvre une commande automatisée autour de l'automate Siemens S7-200 (CPU 226) et du module analogique EM 231. Le procédé a été formalisé dans un cahier des charges précis, les entrées/sorties inventoriées, les composants choisis en fonction des contraintes agroalimentaires, puis le programme développé en langage à contacts sous STEP 7-Micro/WIN. Structuré en vingt-trois réseaux, ce programme gère le remplissage automatique par seuils de niveau, le vidage manuel sécurisé et la signalisation, tout en intégrant des interverrouillages entre remplissage et vidage. La simulation sous PC-SIMU et S7-200 Simulator a confirmé la conformité du fonctionnement au cahier des charges.

En effet, Le procédé a été doté d'une interface de supervision développée sous WinCC flexible. L'animation graphique du synoptique réunit plusieurs éléments dynamiques : bargraphes représentant les niveaux des tampons, indicateurs de marche pour les pompes et coloration spécifique des étiquettes d'électrovannes. Cet ensemble offre à l'opérateur une perception immédiate de l'état du procédé et constitue son interface principale pour la conduite des opérations. Les essais menés en mode Runtime ont validé l'ensemble de la chaîne fonctionnelle, depuis l'action de l'opérateur jusqu'à la mise à jour visuelle.

Ce travail nous a permis de mettre en pratique, sur un cas concret, les différentes étapes d'un projet d'automatisation, depuis l'analyse du besoin jusqu'à la supervision

Plusieurs perspectives peuvent prolonger ce travail :

- L'implantation sur l'installation physique et la mise en service réelle.
- L'enrichissement de la supervision par un système d'alarmes et un historique de production.
- La mise à niveau du système vers des automates S7-1200/S7-1500 et un protocole de communication Ethernet industriel.

Bibliographie

- [1]** Groover M. P., Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing, 5e éd., Pearson, Hoboken, NJ, 2018.
- [2]** Boyer S. A., SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition, 4e éd., ISA — International Society of Automation, Research Triangle Park, NC, 2009.
- [3]** Bolton W., Programmable Logic Controllers, 6e éd., Newnes / Elsevier, Oxford, 2015.
- [4]** Lamb F., Industrial Automation: Hands-On, McGraw-Hill, New York, 2013.
- [5]** Berger H., Automating with SIMATIC S7-1500: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional, 2e éd., Publicis Publishing / Siemens, Erlangen, 2017.
- [6]** Schneider Electric, Catalogue Contacteurs TeSys — Série LC1D, Rueil-Malmaison, France.
- [7]** Siemens AG, Catalogue Moteurs SIMOTICS, Nuremberg, Allemagne.
- [8]** Bürkert Fluid Control Systems, Catalogue des électrovannes, Ingelfingen, Allemagne.
- [9]** Endress+Hauser, Liquipoint FTW — Détecteur de niveau capacitif, Reinach, Suisse.
- [10]** ifm electronic, Operating Instructions O1D100 — Optical Distance Sensor, réf. 80261477, Essen, Allemagne, 2017.
- [11]** Siemens AG, Catalogue SIRIUS ACT — Boutons-poussoirs et voyants de signalisation, Nuremberg, Allemagne.
- [12]** Siemens AG, SIMATIC S7-200 — Manuel système, Nuremberg, Allemagne.
- [13]** Siemens AG, SIMATIC HMI — Catalogue des pupitres opérateurs, Nuremberg, Allemagne.
- [14]** Wildi T. et Sybille G., Électrotechnique, 4e éd., De Boeck Université, Bruxelles, 2005.
- [15]** Siemens AG, SIMATIC HMI WinCC flexible 2008 — Manuel système, réf. 6AV6691-1AB01-3AC0, 2008.