

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Université Abderrahmane Mira
Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue d'obtention du diplôme Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

**Automatisation Et Supervision D'un Système De
Traitement De Vapeur (Détente)**

Préparé par :

- Abdelaziz El Houcine
- Touati Lotfi

Dirigé par :

- M^{elle}. AMARA. Y
- Mr. MIRA .M

Examiné par :

- OUDIAI. F
- HADDAR. H

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers **DOCTOR AMARA. Yasmine** pour son engagement inébranlable et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses conseils éclairés et son expertise ont grandement enrichi notre travail.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers l'entreprise CEVITAL pour nous avoir offert l'opportunité de réaliser notre stage pratique au sein de leur équipe. Nos remerciements les plus sincères à **Mr MIRA Mounir** pour leurs conseils avisés, leur disponibilité et leur soutien constant tout au long de ce projet. Leur expertise et leur encouragement ont été essentiels pour la réussite de ce travail. Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à toute l'équipe de l'unité d'énergie de CEVITAL.

Nous tiendrons également à remercier les membres du jury pour leur temps, leur attention et leurs précieux commentaires qui ont enrichi mon travail.

À nos familles, nous sommes profondément reconnaissants pour leur soutien indéfectible et leur encouragement constant. Leur amour et leur compréhension ont été une source de force tout au long de cette période exigeante.

Sans oublier nos amis, dont les encouragements et le soutien m'ont porté tout au long de ce parcours. Leur amitié a été un véritable moteur pour moi.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents ma mère et mon père les plus chers au
Monde,

Qui m'ont encouragé, soutenue, et surtout conseiller tout au long de
mes études.

A ma chère sœur, Yasmine et A mes cher frère, Lahcen et Billel et À
mes oncles et tantes

A mon Binôme, Lotfi et toute sa famille. A mes amis
(Arar Hocine /Karim /Sifou /Ala)

A tous ceux que j'ai connus durant mon parcours
A tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à
La réalisation de ce modeste travail.

A toute notre promotion 2025.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents ma mère et mon père les plus chers au monde, qui m'ont encouragé, soutenu, et surtout conseiller tout au long de mes études.

A à mes chères sœurs, wissam, siham

A mon Binôme, Hocine et toute sa famille

A toute ma famille de près ou de loin sans exception.

A mes amis surtout (Djeloul, Lyes)

A tous ceux que j'ai connus durant mon parcours

A tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

A toute notre promotion 2025 Automatique et informatique industrielle.

LOTFI

Résumé :

Ce projet de fin d'études porte sur l'étude, la conception, la programmation et la supervision d'un système automatisé de détente de vapeur, appliqué à l'usine industrielle CEVITAL. L'objectif principal consiste à optimiser la gestion de la vapeur par l'automatisation de la régulation de la pression, dans le but d'améliorer à la fois l'efficacité énergétique, la sécurité et la stabilité du procédé. Pour cela, un automate programmable industriel (API) Siemens CPU 313C a été utilisé, pilotant la vanne de détente via un algorithme de contrôle PID, garantissant ainsi une régulation précise et réactive face aux variations des consignes et des charges. La supervision du système a été développée sous TIA Portal V15, grâce à une interface homme-machine (IHM) ergonomique, permettant une visualisation en temps réel et une interaction intuitive pour les opérateurs. La validation fonctionnelle du système a été réalisée à l'aide d'une simulation complète sous PLCSIM, intégrée dans l'environnement TIA Portal, assurant la cohérence des échanges entre les différents modules et composants. Ce travail a démontré que l'automatisation proposée améliore significativement la précision de la régulation, réduit les pertes énergétiques et optimise l'exploitation du système vapeur, tout en renforçant la fiabilité et la sécurité de l'installation.

Mots-clés : Automatisation, Supervision, Détente de vapeur, Automate Programmable Industriel (API), TIA Portal V15, IHM, Régulation de pression, CEVITAL, PLCSIM

Abstract:

This final year project focuses on the study, design, programming, and supervision of an automated steam pressure control system at the CEVITAL industrial plant. The main goal is to improve steam management by automating the pressure regulation process to increase energy efficiency, safety, and system stability. A Siemens CPU 313C programmable logic controller (PLC) was used to control the steam valve using a PID control algorithm. This ensures accurate and quick adjustment of the pressure according to changes in set points or load. The system is supervised through a user-friendly Human-Machine Interface (HMI) developed in TIA Portal V15, which provides real-time monitoring and easy interaction for operators. The system was fully tested using PLCSIM simulation within TIA Portal to verify communication and proper function between components. The results show that the automation improves pressure control precision, reduces energy loss, and optimizes the steam production process while increasing the reliability and safety of the plant.

Keywords: Automation, Supervision, Steam Pressure Reduction, Programmable Logic Controller (PLC), TIA Portal V15, HMI, Pressure Regulation, CEVITAL, PLCSIM.

ملخص:

يركز هذا المشروع في السنة النهائية على دراسة وتصميم وبرمجة والإشراف على نظام آلي للتحكم في تمدد البخار في مصنع سيفيتال الصناعي. الهدف الرئيسي هو تحسين إدارة البخار من خلال أتمتة عملية تنظيم الضغط لزيادة كفاءة الطاقة والسلامة واستقرار النظام. استُخدمت وحدة تحكم منطقية قبلة للبرمجة (PLC) من طراز Siemens CPU 313C للتحكم في صمام البخار باستخدام خوارزمية تحكم PID. يضمن هذا دقةً وسرعةً للضغط وفقاً لتغيرات نقاط الضبط أو الحمل. يُشرف على النظام واجهة تفاعلية سهلة الاستخدام (HMI) مطورة في TIA Portal V15 ، والتي توفر مراقبة آنية وتفاعلًا سهلاً للمشغلين. تم اختبار النظام بالكامل باستخدام محاكاة PLCSIM ضمن TIA Portal للتحقق من الاتصال والتشغيل السليم بين المكونات. تُظهر النتائج أن الأتمتة تحسن دقة التحكم في الضغط، وتقلل من فقدان الطاقة، وتحسن عملية إنتاج البخار مع زيادة موثوقية وسلامة المصنع.

الكلمات المفتاحية: الأتمتة، الإشراف، تمدد البخار، وحدة التحكم المنطقية القابلة للبرمجة (PLC) ، TIA Portal V15 ، واجهة آلة الإنسان (HMI) ، PLCSIM ، (CEVITAL) ، تنظيم الضغط، سيفيتال

Table des Métiers

Remerciements	
Dédicace	
Résumé :	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Liste des Abréviations	
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur la Détente de Vapeur et les Systèmes de Supervision	3
I.1. Introduction	4
I.2. Présentation Générale de CEVITAL	4
I.2.1. CEVITAL (Un Pilier du Développement Industriel en Algérie)	4
I.2.2. La situation géographique de CEVITAL :	4
I.2.3. Diversification et Performance : Les Activités de CEVITAL	6
I.2.4. Les Fondements de la Stratégie de CEVITAL	6
I.2.5. Infrastructure et Énergie	7
I.3. Généralité sur la vapeur	9
I.3.1. Définition	9
I.3.2. Les Différentes Formes de Vapeur d'Eau	9
I.3.3. Avantages de la vapeur d'eau	9
I.3.4. Inconvénients de la vapeur d'eau	10
I.4. Cogénération	10
I.4.1. Les Équipements Clés d'une Centrale de Cogénération	10
I.5. Présentation du Système de Détente de Vapeur	15
I.5.1. Organes de Commande du Système de Désurchauffe de la Vapeur	16
I.6. La Détente de Vapeur : Principes et Applications Industrielles	21
I.6.1. Fondements Thermodynamiques	21
I.6.2. Paramètres Clés de la Détente de Vapeur	22
I.7. Systèmes de Supervision et d'Automatisation	22
I.8. Perspectives et Enjeux Connexes	23
I.9. Conclusion	24
Chapitre II : Étude fonctionnelle et automatisation de la régulation de la détente de vapeur	25
II.1. Introduction	26
II.2. Définition des exigences fonctionnelles	26

II.2.1. Production de vapeur surchauffée	26
II.2.2. Supervision et mesure en continu	27
II.2.3. Régulation de la pression par détente	27
II.2.4. Désurchauffe contrôlée	27
II.2.5. Distribution de la vapeur.....	27
II.2.6. Sécurité intégrée	28
II.2.7. Interface homme-machine (IHM)	28
II.3. Visées Stratégiques de l'Automatisation du Système de Détente de Vapeur ...	28
II.4. Description du système automatisé de détente de vapeur.....	29
II.4.1. Principe de fonctionnement des chaudières	29
II.5. Les différentes vannes du procédé.....	30
II.5.1. Vanne à passage droit ou à passage équerre type 3595 :.....	30
II.5.2. Caractéristiques.....	31
II.5.3. Vanne type 3241	31
II.6. Positionneur électropneumatique Type 3731-3 avec communication HART	32
II.7. Régulation du processus vapeur : principes et mise en œuvre	33
II.7.1. Le rôle de la régulation	33
II.7.2. Boucle ouverte et boucle fermée.....	33
II.7.3. Régulateurs PID.....	35
II.7.4. Méthode de calcul des paramètres d'un régulateur PID	36
II.7.5. Système de régulation de vapeur	37
II.7.6 Critères de performance d'une régulation.....	38
II.8. Système de sécurité et surveillance en temps réel	41
II.8.1. Méthode de détection de rupture de câble et de basculement automatique entre transmetteurs	42
II.8.2. Surveillances en temps réel	42
II.9. Organigramme de fonctionnement	42
II.10. Synthèse des besoins en régulation et contraintes de mise en œuvre.....	46
II.10.1. Exigences fonctionnelles clés	46
II.10.2. Performances attendues	46
II.10.3. Limitations et défis de mise en œuvre	46
II.11. Conclusion	47
Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA.....	48
III.1. Introduction	49
Partie I : Analyse et programmation	49

III.2 Création et configuration de l'environnement de développement	49
III.2.1 Création du projet	49
III.2.2 Configuration matériel	50
III.3. Adressage des E/S (Table des variables)	51
III.4. Conception du programme principal :.....	52
III.4.1 Bloc des entrées analogiques (Mise à l'échelle)	52
III.4.2. Bloc des sorties analogiques (Annuler mise à l'échelle) :	54
III.4.3. Programmation du mode Manuelle/Automatique	55
III.4.4. Programmation du mode de sélection entre les transmetteurs.....	55
III.4.5. Bloc de donnée DB	57
III.4.6. Bloc Fonctions (FC)	58
III.4.7. Bloc de régulation CONT_C :.....	59
Partie II : IHM et supervision.....	61
III.5. Création d'une IHM	61
III.5.1 Création de la table des variables IHM	63
III.5.2. Création et organisation des vues dans l'IHM.....	64
III.6. Conclusion	68
Conclusion Générale.....	69
Bibliographie.....	
Annexes.....	

Liste des Figures

Figures Chapitre I

Figure I. 1 : La situation géographique de CEVITAL	5
Figure I. 2 : Organigramme administrative	8
Figure I. 3 : La Chaudière à Vapeur.....	11
Figure I. 4 : turbine à vapeur.....	12
Figure I. 5 : L'Évapo-Condenseur KAPP.....	13
Figure I. 6 : L'Échangeur de Chaleur.....	14
Figure I. 7 : L'Aérocondenseur.....	15
Figure I. 8 : Vannes pneumatiques Tout ou Rien (TOR).	17
Figure I. 9 : Vannes de Régulation.....	17
Figure I. 10 : Les Pompes centrifuge.	20
Figure I. 11 : Les Positionneurs.	21

Figures Chapitre II

Figure II.1 : Architecture du circuit vapeur : de la chaudière à la distribution industrielle	30
Figure II.2 : Vanne de régulation type 3595	31
Figure II.3 : Vanne type 3241 avec servomoteur type 3271	32
Figure II.4 : Positionneur électropneumatique Type 3731-3 avec Communication HART ...	33
Figure II.5 : Système en boucle ouverte.....	34
Figure II.6 : Système en boucle fermée	35
Figure II.7 : Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation vapeur/température	38
Figure II.8 : Comparaison entre système précis et système non précis	39
Figure II.9 : réaction dynamique : Système rapide et système lent.	40
Figure II.10 : Comportements stables et instables d'un système après perturbation.....	41
Figure II.11 : Diagramme de fonctionnement du système de production et régulation automatique de vapeur	45

Figures Chapitre III

Figure III.1 : Création d'un projet sur TIA Portal	49
Figure III.2 : Configurer un appareil	50
Figure III.3 : Choix des modules	51
Figure III.4 : Table des variables API : Adressage des entrées-sorties	52
Figure III.5 : Bloc des entrées analogiques	53
Figure III.6 : Bloc des sorties analogiques.....	54
Figure III.7 : Bloc de sélecteurs manuelle	56
Figure III.8 : Bloc de Sélectionneur Automatique	57
Figure III.9 : Bloc de donnée DB	58
Figure III.10 : Bloc Fonctions (FC).....	58
Figure III.11 : Bloc de régulation CONT_C	61
Figure III.12 : Création d'une IHM	62
Figure III.13 : Configuration de la connexion entre la CPU et l'IHM	63
Figure III.14 : la table des variables IHM	64

Figure III.15 : Vue du système	65
Figure III.16 : Vue Alarmes	66
Figure III. 17 : Vue contextuelle.....	67
Figure III.18 : Ouverture de la vanne régulatrice de pression en pourcentage	67
Figure III.19 : Ouverture de la vanne régulatrice de température en pourcentage.....	68

Liste des Tableaux

Tableau II.1: Ajustage de gain du régulateur P, PI et PID selon la méthode de Zigler-Nichols en	
BF	37
Tableau II.2: Ajustage de gain de régulateur P, PI et PID selon la méthode de Zigler-Nichols en	
BO.....	37
Tableau III.1: Paramètres d'entrée du régulateur PID.....	59
Tableau III.2: Paramètres de sortie du régulateur PID	60

Liste des Abréviations

- AI** : Analogic Input (Entrée Analogique)
AO : Analogic Output (Sortie Analogique)
API : Automate Programmable Industrielle
CPU : Central Processing Unit
DB : Data Block (Bloc de Données)
DI : Digital Input (Entrée Numérique)
DO : Digital Output (Sortie Numérique)
FB : Function Block (Bloc Fonctionnel)
IA : Intelligence Artificielle
IHM : Interface Homme-Machine
IoT : Internet des Objets
PID : Proportionnel-Intégral-Dérivé
B.O : Boucle Ouverte
B.F : Boucle fermée
P : Proportionnel
I : Intégral
D : Dérivé
E/S : Entre Sorite
OB : Bloc D'organisation
STEP7 : Logiciel de programmation et de simulation
WINCC V15 : Logiciel de supervision
SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition
Tia Portal : Totally integrated automation
CONT_C : Continuous Control
K_{cr} : gain critique
T_{cr} : période critique
T_g : Temps de réponse
T_u : Temps mort

Introduction Générale

Dans le domaine industriel, la production de vapeur constitue un maillon essentiel de nombreux procédés, qu'il s'agisse de la transformation alimentaire, de la production d'énergie ou de la fabrication chimique. Cette vapeur, généralement produite par des chaudières à tubes de fumée, est acheminée sous haute pression vers différentes unités de consommation. Toutefois, pour que le procédé soit fiable, sécurisé et performant, il est impératif de maîtriser avec précision la pression de la vapeur. La régulation de cette pression, notamment au niveau des vannes de détente, devient alors une nécessité opérationnelle.

Face à ces exigences, l'automatisation offre des solutions puissantes, reposant sur l'utilisation d'automates programmables industriels (API), de régulateurs PID, et de plateformes de développement et de supervision intégrées. Ces technologies permettent non seulement d'optimiser le fonctionnement des équipements, mais aussi de minimiser les pertes énergétiques et d'assurer un contrôle continu du système.

Le présent projet de fin d'études s'inscrit dans cette problématique, avec pour cadre réel l'usine CEVITAL, leader dans le secteur agroalimentaire en Algérie. Il porte sur l'étude, la conception, la programmation et la supervision d'un système automatisé de détente de vapeur. L'objectif est de mettre en place une régulation efficace de la pression, basée sur le pilotage d'une vanne par un automate Siemens (CPU 313C) en utilisant un algorithme de type PID.

Le développement de l'application a été réalisé à l'aide du logiciel **TIA Portal V15**, une plateforme intégrée qui regroupe à la fois la configuration matérielle, la programmation, la simulation et la supervision. L'interface homme-machine (IHM), déjà disponible dans TIA Portal, a été exploitée pour concevoir des vues de supervision interactives, permettant une visualisation en temps réel des grandeurs physiques et facilitant l'intervention des opérateurs.

Ce projet a ainsi permis d'aborder plusieurs aspects fondamentaux de l'automatique industrielle, depuis l'analyse fonctionnelle du procédé jusqu'à l'implémentation logicielle d'un système complet de régulation. Il met en évidence l'importance de l'intégration entre le matériel, la logique de commande et l'interface de supervision, dans une logique de performance, de sécurité et de modernisation des installations.

Afin de présenter de manière claire et progressive l'ensemble de ce travail, le mémoire est structuré en **trois chapitres** :

- ❖ **Le premier chapitre** est consacré à la présentation du contexte industriel et des différentes unités concernées au sein de l'usine CEVITAL.
- ❖ **Le deuxième chapitre** traite en détail de l'architecture du système automatisé, des composants utilisés et de la théorie de la régulation PID appliquée au processus.
- ❖ **Le troisième chapitre** décrit l'implémentation concrète du projet sous TIA Portal, avec une attention particulière portée à la programmation de l'automate et à la conception de l'IHM pour la supervision du procédé.

Chapitre I : Généralités sur la Détente de Vapeur et les Systèmes de Supervision

I.1. Introduction

Dans le complexe industriel de CEVITAL, la détente de vapeur est un élément clé pour optimiser la gestion énergétique et garantir un fonctionnement efficace des installations. Ce procédé consiste à réduire la pression de la vapeur tout en régulant sa température et son débit, afin d'assurer une utilisation optimale de l'énergie thermique. Son rôle est crucial pour améliorer le rendement des équipements, limiter les pertes énergétiques et renforcer la sécurité des infrastructures industrielles. Une gestion inefficace de la détente peut entraîner des surconsommations d'énergie et des dysfonctionnements susceptibles d'affecter la production. Pour pallier ces défis, de CEVITAL intègre des systèmes de supervision avancés permettant un suivi en temps réel des paramètres de fonctionnement. Ces technologies offrent un contrôle précis, favorisant une régulation automatique et une meilleure réactivité face aux variations des conditions de production. Grâce à ces dispositifs, l'entreprise optimise ses performances énergétiques tout en réduisant ses coûts d'exploitation. Ce chapitre examine en détail le fonctionnement de la détente de vapeur et met en lumière l'impact des outils de supervision sur l'efficacité industrielle de CEVITAL.

I.2. Présentation Générale de CEVITAL

I.2.1. CEVITAL (Un Pilier du Développement Industriel en Algérie)

CEVITAL, une des premières entreprises algériennes à émerger dans un contexte d'ouverture économique, s'est rapidement imposée comme un acteur clé du développement industriel du pays. Fondée en 1998 à Bejaïa avec des capitaux privés, elle a adopté une stratégie axée sur la diversification et l'expansion, lui permettant de renforcer sa position sur le marché national et international. Son complexe industriel, implanté au port de Bejaïa sur une superficie de 45 000 m², constitue un centre stratégique pour ses opérations. Présente sur trois continents et comptant près de 18 000 employés, CEVITAL joue un rôle majeur dans la croissance économique algérienne. Son reconnaissance en faveur de l'innovation, de la compétitivité et de la création d'emplois fait d'elle un modèle de réussite et un moteur essentiel du secteur industriel. [1]

I.2.2. La situation géographique de CEVITAL :

La situation géographique de CEVITAL constitue un levier majeur pour son développement industriel et commercial. Implantée à seulement 3 km au sud-ouest de Bejaïa, à proximité de la RN 26, l'entreprise bénéficie d'un accès direct aux principales infrastructures de transport. Sa proximité avec le port de Bejaïa et l'aéroport facilite l'importation des matières premières ainsi que l'exportation des produits finis vers les marchés nationaux et internationaux, renforçant ainsi sa compétitivité.

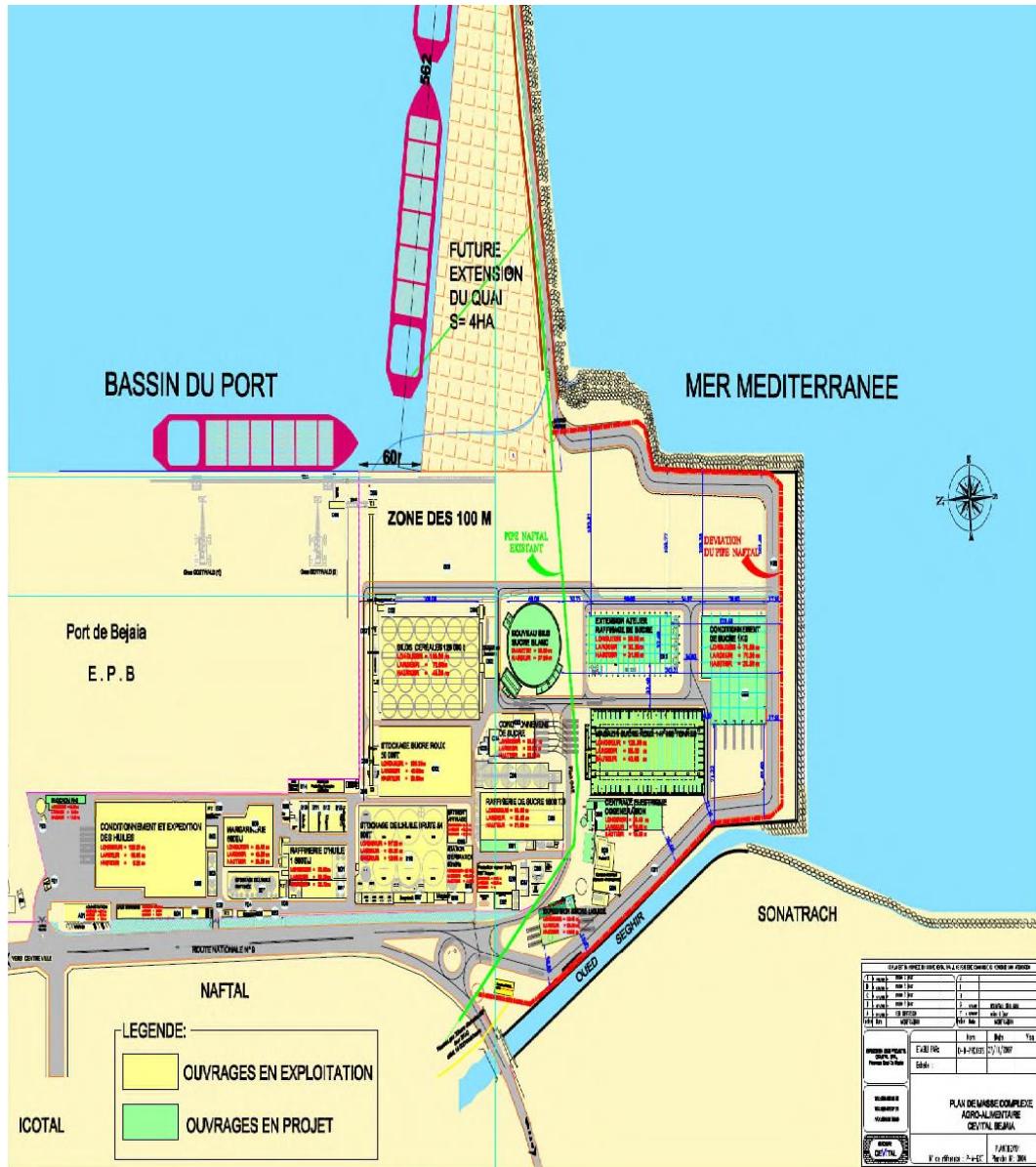


Figure I.1 : La situation géographique de CEVITAL.

Le site industriel de CEVITAL, qui s'étend sur 14 hectares, abrite des infrastructures modernes et un laboratoire de contrôle qualité dédié à l'assurance conformité des produits. Ce laboratoire joue un rôle essentiel dans le respect des normes internationales en matière de qualité, de traçabilité et de sécurité alimentaire. Grâce à cette implantation stratégique, l'entreprise optimise ses processus de production tout en garantissant des produits conformes aux exigences du marché.

En outre, CEVITAL investit continuellement dans la modernisation de ses équipements et dans la formation de son personnel afin de préserver son leadership industriel. Son engagement en faveur du développement durable se traduit par des initiatives visant à réduire son empreinte environnementale et à intégrer des solutions énergétiques respectueuses de l'environnement. Ainsi, grâce à une localisation privilégiée et des infrastructures de pointe, CEVITAL continue de jouer un rôle central dans le développement économique de la région de Bejaïa et de l'Algérie. [1]

I.2.3. Diversification et Performance : Les Activités de CEVITAL

Des secteurs clés de l'agroalimentaire et de l'industrie constituent le cœur des activités de CEVITAL, qui propose une gamme variée de produits de haute qualité. L'entreprise se distingue notamment par la production d'huiles végétales, de sucre, de boissons et de conserves, répondant ainsi aux exigences d'un marché en constante évolution. Grâce à des installations industrielles de pointe et à l'intégration de technologies avancées, CEVITAL consolide sa position de leader en Algérie et renforce sa présence sur les marchés internationaux.

Parmi ses infrastructures phares, l'entreprise dispose de deux raffineries de sucre, capables de produire jusqu'à 6 000 tonnes par jour. Ces unités, parmi les plus performantes du pays, assurent l'approvisionnement du marché local tout en réduisant la dépendance aux importations. En complément, une unité dédiée à la production de sucre liquide permet d'alimenter diverses industries, notamment les secteurs agroalimentaires et pharmaceutique, illustrant ainsi la polyvalence de l'offre du groupe.

Dans le domaine des huiles végétales, CEVITAL exploite une raffinerie à haut rendement, avec une capacité de 2 000 tonnes par jour. Cette unité assure la production d'huiles conformes aux normes internationales et adaptées aux attentes des consommateurs. Par ailleurs, une unité de transformation permet la fabrication de margarine et de produits dérivés, optimisant ainsi l'exploitation des matières premières.

L'entreprise a également diversifié ses activités dans le secteur des boissons avec une unité de conditionnement d'eau minérale et une autre dédiée aux boissons rafraîchissantes, garantissant une large variété de produits tout en répondant aux standards de qualité les plus exigeants. En outre, sa conserverie permet de proposer des produits alimentaires alliant praticité et valeur nutritionnelle.

Pour assurer une qualité irréprochable, CEVITAL s'appuie sur un laboratoire de contrôle qualité intégré et investit continuellement dans l'innovation afin d'optimiser ses procédés industriels tout en minimisant son impact environnemental. Grâce à cette stratégie axée sur la diversification, l'excellence et la durabilité, CEVITAL s'impose comme un acteur incontournable du secteur agroalimentaire, tant en Algérie qu'à l'international. [1]

I.2.4. Les Fondements de la Stratégie de CEVITAL

L'innovation est au cœur du développement de CEVITAL, portée par une vision ambitieuse et une approche méthodique. En privilégiant la compétitivité et l'excellence, l'entreprise adopte une stratégie d'adaptation continue. Acteur majeur de l'économie algérienne, elle mise sur la formation de son personnel et participe activement au progrès national par la création d'emplois et le soutien aux initiatives locales. L'agroalimentaire figure parmi ses principaux domaines d'investissement, aux côtés de l'électroménager, des énergies renouvelables et de la distribution. Cette diversification permet de limiter les risques économiques et de saisir de nouvelles opportunités. L'intégration de technologies avancées, telles que l'automatisation et l'intelligence artificielle, optimise les processus de production et garantit des produits de haute qualité. Engagée dans la recherche et l'innovation, CEVITAL anticipe les évolutions du marché pour renforcer sa compétitivité. La valorisation des compétences internes demeure une priorité, garantissant une croissance durable et un positionnement stratégique solide.

I.2.5. Infrastructure et Énergie

Au sein de CEVITAL, la Direction Énergie et Utilités occupe une position centrale en optimisant les ressources et en améliorant les performances énergétiques de manière continue. Répartie en deux pôles spécialisés, elle assure une gestion efficace de l'énergie et des infrastructures techniques tout en intégrant des pratiques respectueuses de l'environnement pour renforcer à la fois la compétitivité et l'impact écologique du groupe.

- a. **Le Département Électricité** est responsable de la production et de la distribution de l'énergie destinée aux différentes entités du groupe. Il exploite des installations de cogénération, favorisant une production conjointe d'électricité et de chaleur, pour maximiser l'efficacité énergétique. En supervisant des postes haute tension (60 kV et 30 kV), il garantit un approvisionnement stable et sécurisé. Parmi ses principales missions figurent la maintenance des infrastructures électriques et l'adoption de solutions technologiques novatrices pour accroître l'efficacité énergétique.
- b. **Le Département Stockage** gère l'approvisionnement et la gestion stratégique des ressources énergétiques. Il assure un stockage fiable des matières premières énergétiques tout en respectant des normes strictes en matière de sécurité et de qualité. Grâce à une planification anticipative, il répond aux besoins opérationnels en évitant les ruptures et en Maximisant l'utilisation des ressources. En outre, ce département mise sur des solutions écologiques pour réduire l'empreinte carbone du groupe et favoriser l'utilisation des énergies renouvelables.

Grâce à une approche alliant innovation et responsabilité, la Direction Énergie et Utilités de CEVITAL jouent un rôle clé en garantissant la performance, la sécurité et la durabilité des activités du groupe. [1]

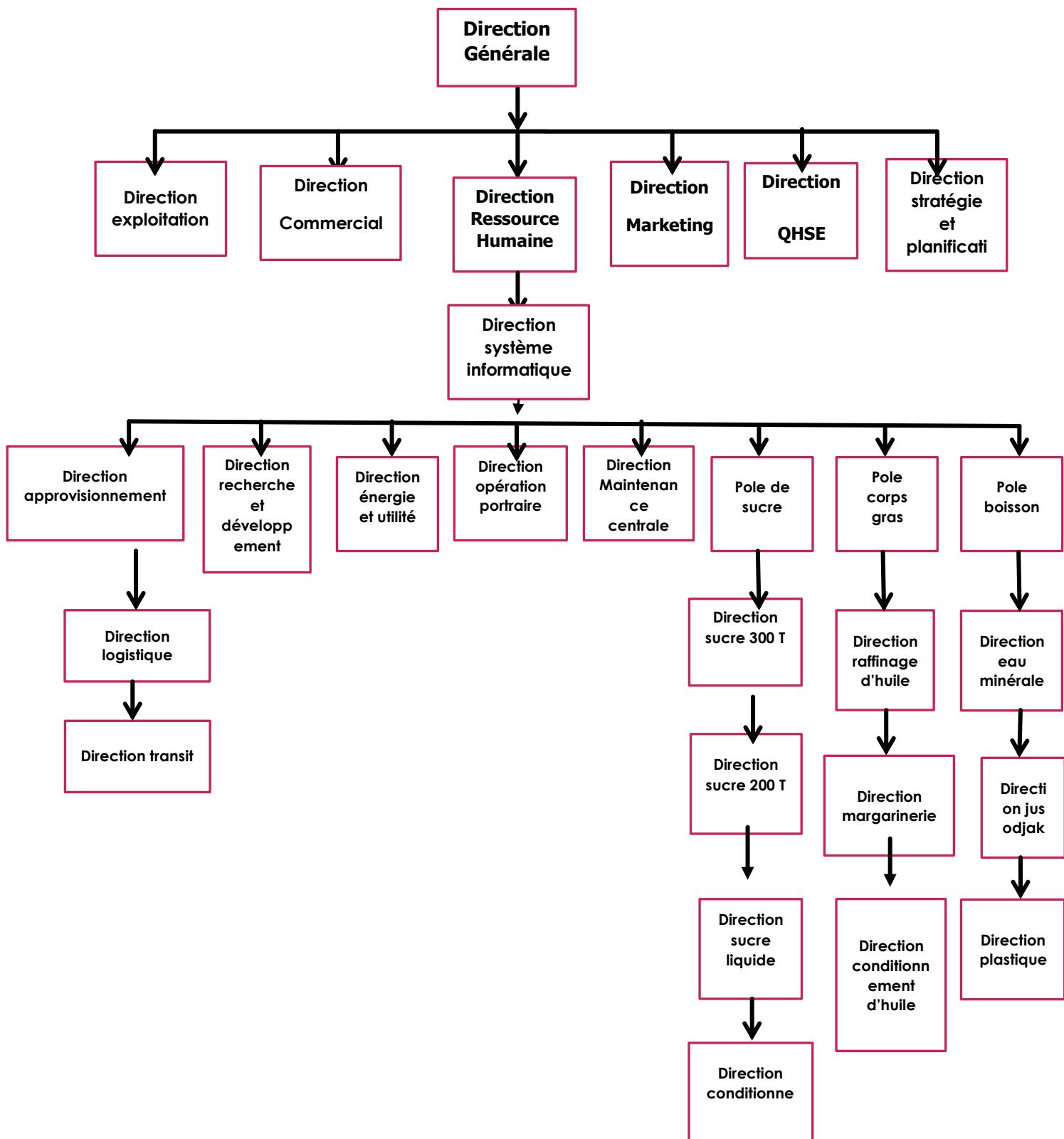


Figure I.2 : Organigramme administratif

I.3. Généralité sur la vapeur

I.3.1. Définition

La vapeur d'eau, issue de la transformation de l'eau liquide sous l'effet de la chaleur, joue un rôle fondamental tant dans la nature que dans l'industrie. Utilisée comme fluide énergétique, elle permet un transfert thermique efficace, essentiel dans des secteurs comme la production d'électricité, le chauffage ou la stérilisation. Grâce à sa capacité à atteindre des températures et pressions élevées, elle optimise le rendement des procédés industriels. Sa disponibilité et son faible impact environnemental en font une ressource précieuse. Ainsi, la vapeur demeure un élément clé pour de nombreuses applications technologiques et énergétiques [2].

I.3.2. Les Différentes Formes de Vapeur d'Eau

Lorsque l'eau est chauffée au-delà de son point d'ébullition (100 °C à pression atmosphérique normale), elle se transforme en vapeur, un gaz invisible et inodore. En fonction des conditions de température et de pression, elle peut se présenter sous différentes formes adaptées à divers usages industriels et énergétiques :

- a. **La vapeur saturée** correspond à un état où l'eau liquide et la vapeur coexistent en équilibre thermique. Toute énergie supplémentaire ajoutée entraîne un changement de phase sans modification de température.
- b. **La vapeur surchauffée**, quant à elle, est obtenue lorsque la vapeur saturée continue d'être chauffée sans être en contact avec de l'eau liquide. Plus stable, elle est particulièrement prisée dans les systèmes nécessitant des températures élevées, comme les turbines de production d'énergie.
- c. **La vapeur désurchauffée** résulte du refroidissement contrôlé de la vapeur surchauffée par injection d'eau, la rapprochant de l'état saturé sans provoquer de condensation.

Chaque type de vapeur présente des propriétés spécifiques qui influencent son utilisation dans les processus thermiques et industriels, garantissant une adaptation optimale aux exigences techniques.

I.3.3. Avantages de la vapeur d'eau

L'utilisation de la vapeur d'eau dans les installations industrielles de CEVITAL présente plusieurs avantages, à la fois techniques, économiques et sanitaires.

- ✓ **Production de chaleur efficace** : La vapeur est un excellent fluide caloporteur qui permet de chauffer rapidement et de manière homogène les matières premières, telles que l'huile, le sucre ou l'eau utilisée dans la production des boissons.
- ✓ **Stérilisation et respect des normes sanitaires** : Dans le secteur agroalimentaire, la vapeur est utilisée pour nettoyer et désinfecter les équipements, garantissant ainsi un haut niveau d'hygiène, conformément aux normes de sécurité alimentaire.
- ✓ **Souplesse d'utilisation** : La vapeur peut être distribuée facilement à travers un réseau interne pour divers usages (chauffage, cuisson, nettoyage), ce qui optimise la gestion des énergies internes.

- ✓ **Récupération et réutilisation** : Le condensat de vapeur peut être récupéré, traité et réutilisé, ce qui permet de limiter les pertes en eau et d'améliorer l'efficacité globale du système.
- ✓ **Réduction de la pollution directe** : Contrairement à certains agents chimiques ou combustibles, la vapeur d'eau ne libère pas de résidus toxiques lorsqu'elle est utilisée, ce qui en fait une solution plus respectueuse de l'environnement immédiat.

I.3.4. Inconvénients de la vapeur d'eau

Malgré ses nombreux avantages, l'utilisation de la vapeur d'eau comporte également des limites et des contraintes qu'il est nécessaire de prendre en compte, notamment dans une logique de durabilité et de sécurité industrielle.

- ✓ **Forte consommation d'énergie** : La production de vapeur nécessite une importante quantité d'énergie, souvent issue de sources fossiles (gaz naturel ou fioul), ce qui peut générer un impact environnemental indirect en termes d'émissions de CO₂.
- ✓ **Risques liés à la pression** : Les installations fonctionnant à vapeur sont soumises à des pressions élevées, ce qui nécessite une surveillance stricte pour éviter les accidents tels que les brûlures ou les explosions.
- ✓ **Entretien et maintenance réguliers** : Les chaudières, turbines, soupapes de sécurité et conduites doivent être régulièrement contrôlées, nettoyées et entretenues pour assurer un fonctionnement optimal et sécurisé.
- ✓ **Corrosion et entartrage** : L'eau utilisée pour produire la vapeur, si elle n'est pas traitée correctement, peut entraîner des phénomènes de corrosion ou de dépôt de tartre dans les conduites, réduisant ainsi la durée de vie des équipements.
- ✓ **Dépendance énergétique** : Le bon fonctionnement du système de vapeur repose sur une alimentation énergétique continue et fiable, ce qui peut poser des problèmes en cas de fluctuation des prix de l'énergie ou de panne de l'approvisionnement

I.4. Cogénération

La cogénération est une approche énergétique performante qui consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une seule source d'énergie, optimisant ainsi le rendement global du système. L'énergie mécanique générée alimente un alternateur, permettant la production d'électricité, laquelle peut être consommée sur site ou injectée dans le réseau. En parallèle, la chaleur résiduelle est récupérée sous forme de vapeur ou d'eau chaude, réduisant ainsi les pertes énergétiques et améliorant l'efficacité globale du processus. Cette technologie, particulièrement adaptée aux secteurs industriels et tertiaires, constitue une solution fiable et durable pour une gestion optimisée des ressources énergétiques.

I.4.1. Les Équipements Clés d'une Centrale de Cogénération

Une centrale de cogénération s'appuie sur des équipements essentiels, interagissant de manière optimisée pour produire simultanément électricité et chaleur. Chaque composant joue un rôle précis dans l'efficacité globale du Système [2].

I.4.1.1. La Chaudière à Vapeur

Au cœur du processus, la chaudière à vapeur génère de la vapeur sous des conditions de pression et de température adaptées aux besoins industriels. Dans la centrale de cogénération de CEVITAL, deux chaudières sont en fonctionnement, alimentées en eau depuis une bâche de stockage. Avant d'atteindre la chaudière, l'eau traverse un économiseur, un dispositif qui préchauffe le fluide afin d'optimiser le rendement énergétique du système. Une fois chauffée, elle est dirigée vers un ballon séparateur où la vapeur est extraite de l'eau restante. Cette vapeur est ensuite soumise à une double surchauffe : une première étape dans un surchauffeur basse température, suivie d'une seconde dans un surchauffeur haute température. Ce procédé permet d'obtenir une vapeur surchauffée, directement exploitable pour les applications énergétiques et industrielles [3].

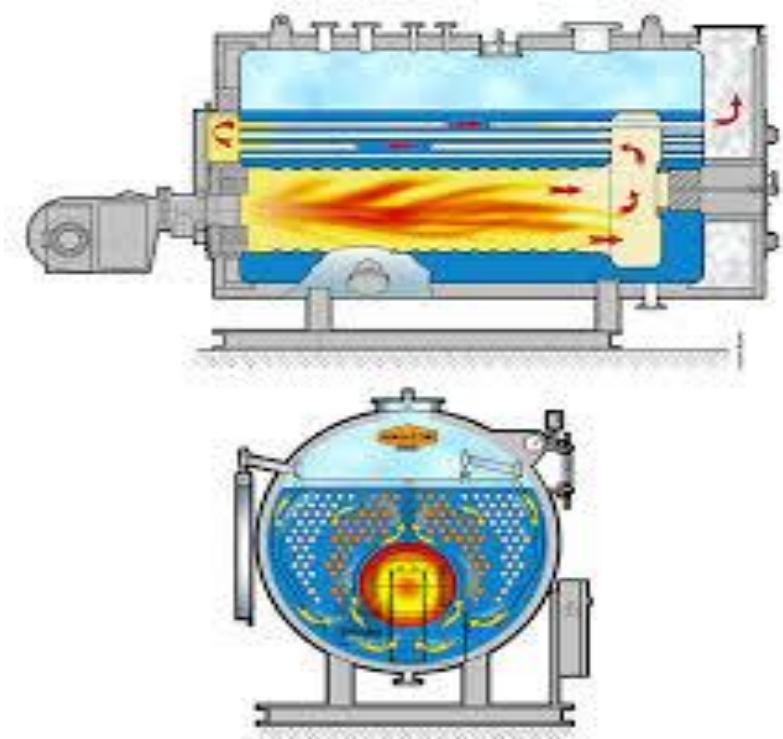


Figure I.3 : La Chaudière à Vapeur.

I.4.1.2. La Turbine à Vapeur

La turbine à vapeur constitue un élément clé de la conversion d'énergie dans une centrale de cogénération. Son rôle principal est de transformer l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique, qui sera ensuite convertie en électricité par un alternateur. Pour préserver l'intégrité des composants internes, notamment les aubes de la turbine, il est impératif que la vapeur utilisée soit totalement sèche. Dans la centrale CEVITAL, deux turbines à vapeur sont intégrées au processus, assurant non seulement la production d'électricité mais aussi la réduction de la pression de la vapeur, passant de 16 bars à 2,5 bars. Cette vapeur détendue est alors directement employée dans le procédé de fabrication du sucre, illustrant ainsi l'efficacité du principe de récupération énergétique.

L'interaction entre la chaudière et la turbine démontre la capacité de la cogénération à améliorer l'efficacité énergétique des installations industrielles. En valorisant simultanément

chaleur et électricité, cette technologie s'inscrit comme une solution durable et optimisée pour répondre aux exigences des processus de production modernes.

Les turbines présentent des caractéristiques remarquables, avec une puissance de 25 MW chacune, une consommation et une restitution de vapeur de 150 tonnes par heure, et une vitesse de rotation atteignant 5900 tours par minute, optimisant ainsi leur performance énergétique et mécanique [4].

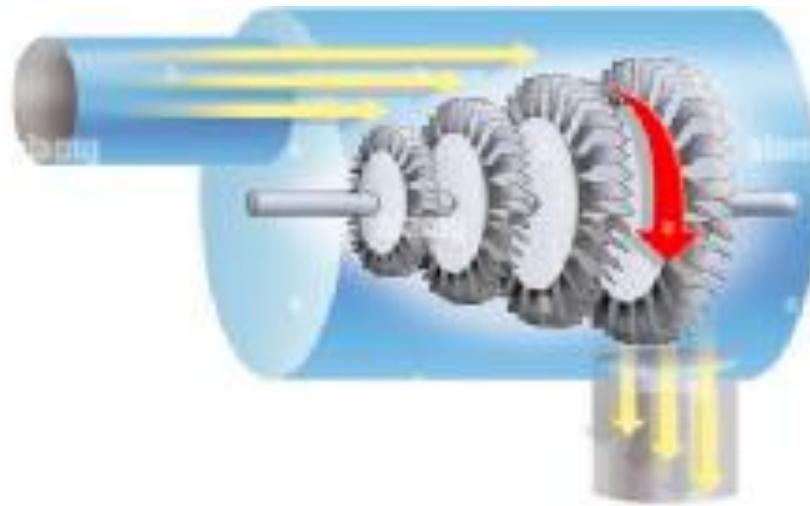


Figure I.4 : turbine à vapeur.

I.4.1.3. L'Évapo-Condenseur KAPP

L'évapo-condenseur, également connu sous le nom de bouilleur, occupe une place centrale dans le processus de cogénération. Son rôle principal est de récupérer la vapeur d'échappement des turbines ainsi que celle issue du désurchauffage, dont les conditions atteignent environ 1,8 bar et 140 °C, pour la transformer en une vapeur basse pression avoisinant 1 bar et 120 °C. Cette vapeur ainsi détendue est intégralement valorisée pour des usages industriels spécifiques, notamment dans la production du sucre.

Le système de bouilleurs est structuré en deux lignes distinctes et autonomes, chacune intégrant trois unités fonctionnant en parallèle. Cette configuration permet d'atteindre une capacité globale de production de 150 tonnes par heure de vapeur saturée à 120 °C, soit un rendement individuel de 50 tonnes par heure par bouilleur.

Pour optimiser les performances énergétiques, l'évapore-condenseur est doté de technologies avancées améliorant le transfert thermique et maximisant la récupération d'énergie. Ce dispositif contribue ainsi à une meilleure efficacité globale du système de cogénération, réduisant les pertes énergétiques et renforçant la durabilité des procédés industriels.

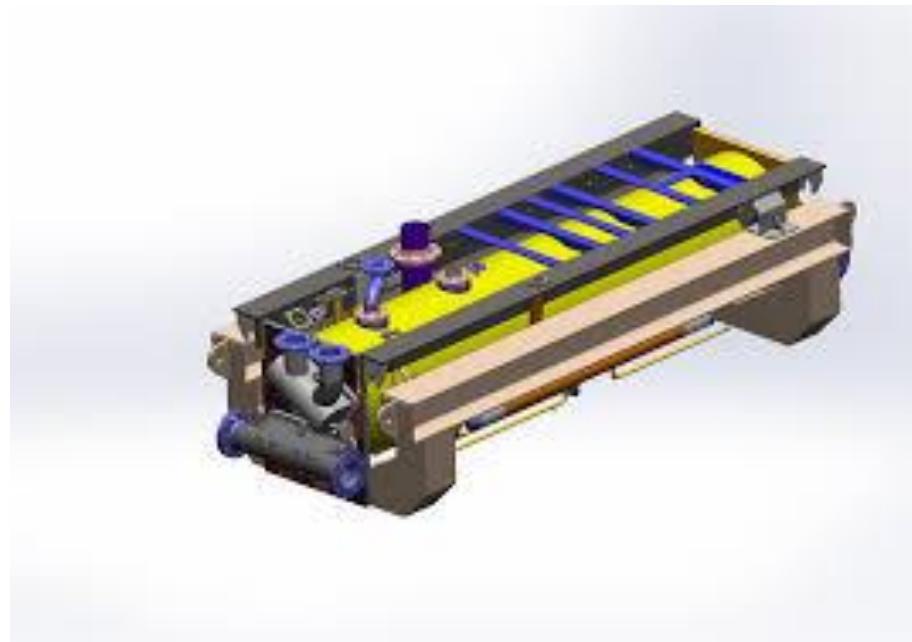


Figure I. 5 : L'Évapo-Condenseur KAPP.

I.4.1.4. L'Échangeur de Chaleur

Les échangeurs de chaleur occupent une fonction essentielle dans les systèmes thermiques en permettant le transfert d'énergie entre deux fluides de températures différentes, sans contact direct. Ce processus repose sur une paroi intermédiaire servant de surface d'échange, garantissant ainsi une transmission efficace de la chaleur tout en maintenant l'isolation physique des fluides.

Au sein de la centrale de cogénération de CEVITAL, deux échangeurs de type à plaques sont intégrés. Leur conception compacte et leur large surface de contact favorisent un transfert thermique optimisé, améliorant ainsi le rendement énergétique global. Ces équipements assurent une récupération efficace de la chaleur tout en préservant l'intégrité des fluides traités, un critère essentiel pour maintenir la performance et la fiabilité des processus industriels.

Grâce à leur efficacité et leur robustesse, ces échangeurs jouent un rôle clé dans la régulation thermique de l'installation, contribuant à l'optimisation énergétique et à la durabilité des opérations industrielles [5].



Figure I.6 : L'Échangeur de Chaleur.

I.4.1.5. L'Aérocondenseur

L'aérocondenseur est un dispositif thermique essentiel permettant l'évacuation efficace de la chaleur contenue dans un fluide en le refroidissant au moyen d'un puits froid, généralement l'air ambiant. Ce processus entraîne la condensation de la vapeur en liquide, favorisant ainsi la récupération et la réutilisation de l'eau dans le cycle énergétique. Deux méthodes principales sont employées pour le refroidissement :

- **Condensation par contact direct** : l'air ambiant est en interaction directe avec la vapeur, favorisant un échange thermique rapide.
- **Condensation par échange indirect** : la chaleur est transférée à travers une paroi, garantissant une séparation stricte entre les fluides et évitant toute contamination.

Dans la centrale de cogénération de CEVITAL, une batterie d'aérocondenseurs est utilisée pour condenser jusqu'à 150 tonnes de vapeur par heure. Ces équipements jouent un rôle clé dans la gestion du réseau vapeur, en régulant l'excédent en cas de faible consommation ou de surpression. La vapeur condensée est ensuite récupérée sous forme d'eau et réintroduite dans le cycle via la bâche alimentaire, optimisant ainsi la gestion des ressources et minimisant les pertes thermiques.

L'intégration de ce système contribue non seulement à améliorer le rendement énergétique global, mais aussi à stabiliser le fonctionnement de l'installation tout en réduisant l'impact environnemental lié au gaspillage d'énergie [6].



Figure I. 7 : L'Aérocondenseur.

I.4.1.6. Alternateurs dans le Système de Cogénération de CEVITAL

Le système de cogénération de CEVITAL intègre deux turboalternateurs Thermo- dyne d'une puissance nominale de **25 MW** chacun, assurant la conversion de l'énergie mécanique générée par les turbines à vapeur en électricité. Cette production électrique peut être directement consommée au sein des installations industrielles de CEVITAL ou, selon les besoins, être injectée dans le réseau national.

Ces turboalternateurs sont spécifiquement conçus pour fonctionner en parfaite synchronisation avec les turbines, garantissant ainsi une production électrique stable et efficiente. Leur architecture optimise la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique, limitant les pertes et améliorant le rendement global du système.

En intégrant ces équipements de haute performance, la centrale de cogénération de CEVITAL maximise l'efficacité énergétique et favorise une gestion optimisée des ressources, contribuant ainsi aux objectifs de durabilité et de performance industrielle.

I.5. Présentation du Système de Détente de Vapeur

Le système de détente vapeur joue un rôle clé dans la centrale de cogénération en adaptant les caractéristiques de la vapeur issue des chaudières aux exigences des procédés industriels. Initialement produite sous forme de vapeur surchauffée à 200°C et 13 bars, elle est transformée en vapeur à 120°C et 1,2 bars, mieux adaptée aux besoins des installations.

Ce processus repose sur deux mécanismes fondamentaux : la désurchauffe et la détente. La désurchauffe est réalisée par l'injection contrôlée d'eau à travers une vanne spécifique, permettant une absorption partielle de l'énergie thermique et une diminution de la température de la vapeur. La détente est assurée par une vanne de régulation qui ajuste la pression en fonction des impératifs industriels.

En cas d'indisponibilité d'une turbine, le système maintient l'approvisionnement en vapeur grâce à un mode de fonctionnement autonome. La vanne de désurchauffe peut directement

traiter la vapeur surchauffée des chaudières, garantissant ainsi la continuité des opérations dans les deux raffineries de sucre.

Doté d'instruments de mesure avancés et de dispositifs de régulation précis, ce système optimise le contrôle des paramètres thermodynamiques (pression, température, débit), contribuant ainsi à la fiabilité et à l'efficacité énergétique de l'installation [7].

I.5.1. Organes de Commande du Système de Désurchauffe de la Vapeur

Pour contrôler le système de désurchauffe de la vapeur, différents équipements sont utilisés :

I.5.1.1. Les vannes

a. Vannes manuelles

Les vannes manuelles sont des dispositifs mécaniques équipés d'un élément mobile permettant d'ouvrir, de fermer ou de moduler le passage d'un fluide dans un circuit. Elles assurent un contrôle direct du débit en fonction des besoins opérationnels et offrent une solution simple et fiable pour la gestion des flux.

Leur usage est particulièrement pertinent dans les situations nécessitant des ajustements ponctuels ou une intervention humaine pour des réglages précis. En raison de leur robustesse et de leur facilité d'utilisation, ces vannes sont couramment employées pour la maintenance, l'isolement de circuits ou la régulation fine des paramètres du système de désurchauffe de la vapeur.

b. Vannes pneumatiques Tout ou Rien (TOR)

Les vannes pneumatiques TOR (Tout ou Rien) sont des dispositifs de commande utilisés pour réguler le débit des fluides dans un circuit en adoptant exclusivement deux états : ouvert ou fermé. Ce fonctionnement binaire (0 % ou 100 %) les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant une action rapide et sans modulation intermédiaire.

Dotées d'un mécanisme pneumatique, ces vannes assurent une commande fiable et réactive, même dans des environnements industriels exigeants. Elles sont largement utilisées dans les systèmes automatisés nécessitant rapidité d'exécution et précision du contrôle, notamment pour la gestion des flux dans les processus de désurchauffe de la vapeur. Leur robustesse et leur simplicité d'utilisation en font des éléments essentiels pour garantir un contrôle efficace et sécurisé des fluides dans les installations industrielles.



Figure I. 8 : Vannes pneumatiques Tout ou Rien (TOR).

c. Vannes de Régulation

Les vannes de régulation occupent une place stratégique dans les systèmes automatisés, en permettant un contrôle précis de paramètres tels que la pression, le débit et la température. Contrairement aux vannes Tout ou Rien (TOR), elles ne se limitent pas à un fonctionnement binaire, mais ajustent en continu leur ouverture afin de stabiliser les conditions de processus et d'optimiser la performance énergétique des installations.



Figure I. 9 : Vannes de Régulation.

I.5.1.2 Fonctionnement et Utilisation des Vannes

Parmi les composants essentiels des systèmes de régulation automatisés, la vanne occupe une place centrale. Elle est conçue pour gérer et ajuster le débit d'un fluide, assurant ainsi le contrôle optimal des paramètres clés tels que la pression, le niveau, le débit ou la température. Dans le cadre de l'automatisation et du pilotage d'un système de détente de vapeur, elle agit comme un actionneur stratégique, garantissant la précision et la fiabilité nécessaires aux processus industriels.

I.5.1.3. Architecture d'une Vanne

La vanne, utilisée dans divers processus industriels, se compose généralement de plusieurs éléments permettant de contrôler efficacement le flux d'un fluide. Voici ses principaux composants :

- **L'actionneur** : Il traduit un signal de commande (électrique, pneumatique ou hydraulique) en un mouvement mécanique, permettant ainsi d'ouvrir, de fermer ou de réguler l'ouverture de la vanne. Cet élément garantit une réponse rapide et précise aux consignes données.
- **Le pré-actionneur** : Placé en amont de l'actionneur, il prépare et adapte le signal de commande, assurant une compatibilité optimale avec l'actionneur pour une exécution fiable des instructions.
- **Le positionneur** : Chargé de réguler avec précision la position de la vanne, il ajuste en continu son ouverture en fonction des consignes reçues. Cela permet de stabiliser les paramètres régulés tels que le débit ou la pression et d'assurer une performance constante.

Ces composants travaillent en synergie pour garantir une intégration optimale de la vanne dans des systèmes automatisés, comme ceux dédiés à la détente de vapeur, et contribuent à l'efficacité des opérations industrielles tout en répondant aux exigences de précision et de fiabilité [8].

I.5.1.4. Sélection d'une Vanne pour un Système Automatisé de Détente de Vapeur

Le choix d'une vanne destinée à un système automatisé de détente de vapeur repose sur plusieurs critères techniques et fonctionnels afin d'assurer une performance optimale et une longévité accrue. Plusieurs éléments doivent être pris en compte :

Compatibilité avec le fluide : Il est essentiel que la vanne soit adaptée au type de fluide en circulation, notamment la vapeur ou l'eau. Une mauvaise correspondance peut provoquer une usure prématuée, des problèmes de corrosion ou des

- ❖ **Des fonctionnements** : Opter pour des matériaux résistants et appropriés garantit une meilleure durabilité.
- ❖ **Résistance aux températures élevées** : Dans les systèmes de détente de vapeur, les conditions thermiques peuvent être extrêmes. La vanne choisie doit être capable de fonctionner sans altération sous ces températures afin de préserver la sécurité et la fiabilité du dispositif.
- ❖ **Réduction du bruit** : La circulation à haute pression peut engendrer des nuisances sonores significatives. Pour limiter ces désagréments, il est recommandé de sélectionner une vanne intégrant des mécanismes de réduction du bruit, améliorant ainsi le confort sonore dans l'environnement industriel.

- ❖ **Sens d'écoulement du fluide** : Selon l'architecture du système, la vanne peut être conçue pour permettre un passage unidirectionnel ou bidirectionnel du fluide. Ce facteur influence directement la technologie et la conception adaptées.
- ❖ **Encombrement et poids** : L'intégration de la vanne doit tenir compte des contraintes d'espace et de charge. Un modèle trop volumineux ou trop lourd peut poser des difficultés lors de l'installation et de la maintenance.
- ❖ **Type de raccordement** : Les raccords doivent être compatibles avec les conduites existantes afin d'éviter des modifications structurelles coûteuses. Une correspondance adéquate simplifie également l'installation et renforce la fiabilité du système.
- ❖ **Facilité de maintenance** : Un accès rapide aux composants internes permet de simplifier l'entretien et de minimiser les interruptions d'exploitation. Privilégier des modèles offrant une maintenance aisée contribue à réduire les coûts d'intervention.
- ❖ **Rentabilité à long terme** : Au-delà du coût d'acquisition, il est important d'évaluer la durabilité et la fiabilité de la vanne. Un modèle de qualité, bien que plus onéreux à l'achat, peut engendrer des économies en limitant les réparations et les remplacements fréquents.

En tenant compte de ces paramètres, il est possible de sélectionner une vanne adaptée aux exigences spécifiques du système de détente de vapeur, garantissant ainsi une efficacité accrue et une exploitation durable.

❖ **Principes de Fonctionnement**

Le fonctionnement d'une vanne de régulation repose sur une boucle de contrôle intégrée, composée des éléments suivants [9] :

- **Capteurs** : Ils surveillent en temps réel des grandeurs telles que la pression, la température ou le débit du fluide.
- **Régulateurs** : Ces dispositifs analysent les données des capteurs et envoient des signaux correctifs pour maintenir les valeurs souhaitées.
- **Positionneurs (optionnels)** : Ils affinent le réglage en ajustant précisément l'ouverture de la vanne pour garantir une réponse rapide et stable aux variations du système.

Avec cette conception, les vannes de régulation répondent immédiatement aux variations des conditions opérationnelles, garantissant une stabilité renforcée et une maîtrise optimale des flux dans les processus industriels.

❖ **Composants Principaux d'une Vanne de Régulation**

- **Servomoteur** : Convertit un signal de commande (électrique, pneumatique ou hydraulique) en un mouvement mécanique permettant d'ajuster l'ouverture de la vanne.
- **Corps de Vanne** : Élément central qui dirige et contrôle le passage du fluide. Il intègre des composants comme les sièges et les clapets, assurant une régulation précise du débit.
- **Dispositifs Complémentaires** :
 - ✓ **Contacteurs de début et fin de course** : Déetectent et signalent les positions extrêmes (ouvert/fermé) pour un suivi efficace du fonctionnement.

- ✓ **Recopie de position** : Permet une surveillance en temps réel de l'ouverture de la vanne, garantissant une gestion optimale du processus.
- ✓ **Positionneur** : Améliore la précision en modulant continuellement la position de la vanne selon les consignes du régulateur.

❖ Applications et Avantages

Les vannes de régulation sont essentielles dans les industries nécessitant un contrôle précis des flux : centrales énergétiques, raffineries, agroalimentaire, chimie, etc. Elles contribuent à réduire les pertes énergétiques, améliorer l'efficacité des installations et garantir une exploitation fiable et durable.

I.5.1.5. Les Pompes centrifuge

La pompe centrifuge est un dispositif mécanique rotatif utilisé pour le transport de fluides, fonctionnant sur le principe de la force centrifuge. Elle est largement adoptée dans les secteurs industriels, en raison de sa simplicité, de sa fiabilité et de son efficacité énergétique.



Figure I.10 : Les Pompes centrifuge.

❖ Principe de Fonctionnement

Le cœur de la pompe est un élément appelé impulsor (ou roue à aubes), qui tourne à grande vitesse. Son action permet de :

- ✓ **Aspirer le fluide** par le centre de la roue en créant une dépression axiale.
- ✓ **Accélérer le fluide** en lui transférant de l'énergie cinétique grâce à la rotation de l'impulsor.
- ✓ **Éjecter le fluide** tangentiellement à haute pression via le corps de pompe, facilitant ainsi son acheminement vers le circuit souhaité.

❖ Avantages et Applications

Grâce à sa conception robuste et adaptable, la pompe centrifuge est utilisée dans divers domaines, notamment :

- ✓ **Industrie** : Transfert de fluides dans les processus chimiques, pétroliers et agroalimentaires.

- ✓ **Énergie** : Circulation des liquides dans les circuits de refroidissement des centrales thermiques et nucléaires.
- ✓ **Hydraulique** : Pompage d'eau potable, irrigation et assainissement.

Sa capacité à fonctionner de manière continue et avec un entretien réduit en fait un élément essentiel pour les infrastructures industrielles et énergétiques modernes [10].

I.5.1.6. Les Positionneurs de Vanne : Fonctionnement et Avantage

Le positionneur de vanne est un dispositif d'asservissement crucial dans les systèmes industriels, permettant un contrôle précis du mouvement du clapet d'une vanne. Il joue un rôle déterminant dans l'optimisation de la régulation des flux, garantissant que la position de la vanne correspond exactement aux consignes définies par le système de commande.



Figure I.11 : Les Positionneurs.

❖ Principe de Fonctionnement

Le positionneur fonctionne comme un intermédiaire intelligent entre le système de contrôle et l'actionneur de la vanne. Il reçoit un signal de commande (pneumatique, électrique ou numérique) et ajuste en conséquence l'ouverture ou la fermeture de la vanne, en maintenant une parfaite synchronisation avec les besoins du processus.

❖ Avantages

- ✓ **Précision accrue** : Assure un positionnement exact du clapet, réduisant les écarts et améliorant la régulation des fluides.
- ✓ **Réactivité optimisée** : Permet une adaptation rapide aux variations de charge et aux changements de consigne.
- ✓ **Fiabilité renforcée** : Maintient une performance stable, même dans des conditions industrielles difficiles (pression élevée, températures extrêmes).
- ✓ **Réduction des pertes énergétiques** : Minimise les erreurs de positionnement, optimisant ainsi l'efficacité énergétique du système.

En raison de ses performances élevées en matière de régulation et de stabilité, le positionneur représente une composante essentielle pour les processus exigeant un contrôle strict des flux, notamment dans les secteurs pétrochimiques, agroalimentaires et énergétiques.

I.6. La Détente de Vapeur : Principes et Applications Industrielles

I.6.1. Fondements Thermodynamiques

La détente de vapeur repose sur les principes fondamentaux de la thermodynamique, qui permettent d'optimiser ses applications industrielles :

- a. **Première loi de la thermodynamique** : Elle établit la conservation de l'énergie, indiquant que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transformée. Dans le cas de la détente de vapeur, cette loi explique comment l'énergie thermique est convertie en travail mécanique ou en chaleur.
- b. **Deuxième loi de la thermodynamique** : Elle met en évidence les limites des transformations énergétiques en intégrant les pertes inévitables liées à l'irréversibilité des processus. Ce principe est crucial pour comprendre la conversion d'énergie thermique en travail utile et la gestion des pertes énergétiques. [5]

I.6.2. Paramètres Clés de la Détente de Vapeur

Une mise en œuvre efficace de la détente de vapeur nécessite la prise en compte de plusieurs **paramètres essentiels** :

- a. **Pression et Température de la Vapeur** : Ces deux variables déterminent l'**état énergétique** de la vapeur et son **potentiel de transformation** dans les applications industrielles. Un contrôle précis de ces paramètres garantit une **optimisation du rendement thermique** et une meilleure adaptation aux besoins des procédés.
- b. **Conversion Énergétique et Rendement Thermique** : Ce critère évalue la capacité du système à transformer l'énergie thermique en travail mécanique ou en une autre forme d'énergie utile. L'optimisation du rendement thermique permet de réduire les pertes énergétiques et d'améliorer la performance globale des installations.
- c. **Impact sur les Équipements Industriels** : La détente de vapeur a une influence directe sur la durabilité et la fiabilité des équipements. Une gestion efficace du processus permet de :
 - ✓ Réduire les contraintes mécaniques sur les machines,
 - ✓ Augmenter la longévité des équipements,
 - ✓ Maintenir un fonctionnement optimal des systèmes industriels.

En intégrant ces principes et paramètres, les industriels peuvent maximiser l'efficacité énergétique, réduire les coûts d'exploitation et prolonger la durée de vie des équipements, tout en maintenant un haut niveau de performance.

I.7. Systèmes de Supervision et d'Automatisation

❖ Rôle et Impact des Systèmes de Supervision

L'intégration de **systèmes** de supervision et d'automatisation dans les processus de détente de vapeur offre plusieurs avantages techniques et opérationnels :

- ✓ **Optimisation des performances** : Ces systèmes ajustent en temps réel les paramètres de fonctionnement, garantissant une meilleure efficacité énergétique et une réduction des pertes thermiques.
- ✓ **Diminution des erreurs humaines** : L'automatisation réduit le besoin d'interventions manuelles, améliorant ainsi la précision et la fiabilité des processus.
- ✓ **Gestion énergétique proactive** : En adaptant dynamiquement la production aux besoins réels, ces systèmes permettent de minimiser la consommation énergétique et d'optimiser les coûts d'exploitation.

❖ Technologies Employées

L'efficacité des systèmes de supervision repose sur plusieurs technologies avancées :

- **Automates Programmables Industriels (API/PLC) :**

Ces dispositifs assurent le contrôle autonome des équipements en exécutant des programmes optimisés. Leur utilisation permet une régulation précise, une réactivité accrue et une adaptation rapide aux variations des conditions de fonctionnement.

- **Systems SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):**

Ces plateformes centralisées permettent de :

- ✓ Surveiller en temps réel l'état des installations.
- ✓ Collecter et analyser des données critiques.
- ✓ Prévoir et prévenir les pannes grâce à des algorithmes de gestion prédictive,
- ✓ Améliorer la prise de décision par l'intermédiaire d'interfaces graphiques interactives.

- **Capteurs intelligents et actionneurs :**

Ces dispositifs permettent de mesurer et ajuster avec précision des paramètres essentiels tels que :

- ✓ **Pression,**
- ✓ **Température,**
- ✓ **Débit.**

Ils assurent une régulation fine du processus, renforçant ainsi la stabilité et la performance du système de détente de vapeur.

En combinant ces technologies, les systèmes de supervision et d'automatisation garantissent une gestion optimisée, une meilleure sécurité des installations et une amélioration continue des performances industrielles.

I.8. Perspectives et Enjeux Connexes

❖ Enjeux Environnementaux

L'optimisation du système de détente de vapeur s'inscrit dans une démarche de réduction de l'impact environnemental à travers plusieurs axes stratégiques :

- ✓ **Réduction de l'empreinte carbone** : Une meilleure gestion énergétique permet de diminuer les émissions de CO₂, contribuant ainsi aux objectifs de décarbonations industrielles.
- ✓ **Réutilisation des rejets thermiques** : La valorisation de la chaleur résiduelle permet de limiter les pertes énergétiques et d'améliorer le rendement global des installations.
- ✓ **Engagement pour des pratiques durables** : Ces systèmes intègrent des approches écoresponsables, alignées avec les standards environnementaux de l'industrie moderne [11].

❖ Normes et Conformité Réglementaire

L'usine **CEVITAL Bejaïa** adhère aux normes internationales, garantissant ainsi une gestion performante et sécurisée :

- **ISO 50001** : Assure une gestion efficace de l'énergie, améliorant la performance énergétique et réduisant les coûts d'exploitation.
- **ISO 14001** : Garantit une gestion environnementale rigoureuse, minimisant l'impact des activités industrielles sur l'écosystème.
- **Normes de sécurité industrielle** : Assurent la protection des installations et des opérateurs, tout en renforçant la durabilité des équipements.

❖ Innovations Technologiques et Perspectives d'Évolution

Les avancées technologiques offrent des opportunités d'amélioration continue, notamment à travers :

- **Intelligence artificielle (IA) et Internet des Objets (IoT)** :

Ces technologies permettent une supervision avancée, une optimisation en temps réel et une gestion proactive des processus industriels.

- **Maintenance prédictive** :

Grâce à l'analyse de données en temps réel, la maintenance prédictive anticipe les défaillances et prolonge la durée de vie des équipements, réduisant ainsi les arrêts non planifiés.

- **Simulation numérique et modélisation des processus** :

Ces outils facilitent l'optimisation des systèmes en testant virtuellement différents scénarios, ce qui améliore la prise de décision et renforce la fiabilité des installations.

I.9. Conclusion

L'analyse du système de détection de vapeur de l'usine CEVITAL Bejaïa souligne son importance pour l'optimisation énergétique et la fiabilité industrielle. L'association d'équipements performants et d'une gestion rigoureuse des paramètres thermodynamiques garantit des performances stables. L'intégration des technologies de supervision et d'automatisation a réduit les pertes énergétiques et les interventions humaines. Le respect des normes internationales reflète une démarche d'excellence industrielle et environnementale. Ces améliorations ouvrent la voie à l'automatisation optimale du processus. Le chapitre suivant explorera les solutions technologiques mises en place.

Chapitre II : Étude fonctionnelle et automatisation de la régulation de la détente de vapeur

II.1. Introduction

La régulation de la pression de vapeur représente un enjeu essentiel dans les procédés industriels utilisant la vapeur comme source d'énergie thermique. Une détente contrôlée est nécessaire pour adapter cette pression aux besoins des équipements tout en garantissant la sécurité, l'efficacité énergétique et la stabilité du système. Ce processus implique une régulation fine, rendue possible grâce à l'automatisation.

L'intégration de régulateurs PID permet de maintenir la pression de sortie à une valeur de consigne, malgré les variations de charge ou les perturbations en amont. Cette régulation agit sur les organes de détente et les injecteurs d'eau du désurchauffeur afin de préserver les conditions thermodynamiques requises. Ainsi, l'automatisation de la détente de vapeur assure un fonctionnement fiable et optimisé du procédé. Le présent chapitre expose les objectifs, exigences fonctionnelles et principes de commande du système étudié.

II.2. Définition des exigences fonctionnelles

Dans un contexte industriel, un système automatisé n'acquiert sa pleine valeur que s'il parvient à répondre de manière rigoureuse et fiable aux besoins opérationnels pour lesquels il a été conçu. Les exigences fonctionnelles constituent, à ce titre, le socle technique sur lequel repose la conception du système. Elles traduisent les attentes concrètes en matière de performances, de sécurité, de fiabilité et d'interaction homme-machine. Dans le cas du système de production, de détente et de distribution de vapeur, ces exigences visent à garantir un apport thermique maîtrisé, continu et adapté aux différents procédés industriels en aval, notamment au sein des raffineries de sucre et d'huile [12].

Les exigences fonctionnelles s'articulent autour de plusieurs axes essentiels : la production d'une vapeur surchauffée selon des conditions thermodynamiques précises (pression, température, débit), la régulation dynamique de ces paramètres, la distribution sécurisée vers les unités consommatrices, la gestion des états transitoires (détente et désurchauffe), la supervision temps réel et l'intégration des dispositifs de sécurité. Elles conditionnent directement le choix des équipements, la configuration de l'architecture d'automatisation, et la mise en œuvre des boucles de régulation [12].

II.2.1. Production de vapeur surchauffée

La production de vapeur constitue la première fonction clé du système. Elle repose sur un ensemble de chaudières à tubes de fumée capables de générer une vapeur surchauffée à 200 °C et 13 bars, avec un débit nominal de 40 tonnes par heure. Le processus comporte les étapes suivantes [12] :

- **Combustion du combustible** : le foyer assure la combustion du fuel, libérant une quantité importante d'énergie thermique.
- **Évaporation** : l'eau contenue dans l'enveloppe de la chaudière est portée à ébullition au contact des parois chauffées des tubes, produisant de la vapeur saturée.
- **Surchauffe** : la vapeur est dirigée vers un surchauffeur où elle est chauffée au-delà de son point de saturation, ce qui améliore son efficacité énergétique en éliminant toute trace d'humidité.

Cette configuration garantit un rendement thermique élevé et une stabilité des conditions de production, essentielles pour alimenter efficacement les procédés consommateurs.

II.2.2. Supervision et mesure en continu

Le bon fonctionnement du système repose sur une instrumentation fiable et une surveillance en temps réel de l'ensemble des paramètres critiques [13] :

- **Capteurs de pression et de température** placés aux points stratégiques (sortie de chaudière, surchauffeur, collecteur).
- **Boucles de régulation automatique**, intégrées à l'automate, permettant d'ajuster en permanence les consignes selon les valeurs mesurées.
- **Système d'alarme intelligent**, déclenchant des actions correctives ou des arrêts d'urgence en cas de dérive significative par rapport aux seuils de sécurité.

La continuité de la mesure est indispensable pour maintenir les conditions de vapeur optimales et prévenir les incidents.

II.2.3. Régulation de la pression par détente

La vapeur produite à haute pression doit être adaptée aux contraintes spécifiques des installations utilisatrices. Pour cela, un dispositif de détente est intégré au système [13] :

- **Vanne de détente motorisée**, commandée automatiquement en boucle fermée pour réduire la pression de 13 à 1.2 bars.
- **Régulation continue**, tenant compte des variations de consommation pour maintenir une pression stable en aval.

Cette opération évite les fluctuations de pression susceptibles de nuire aux équipements ou de perturber le fonctionnement des procédés.

II.2.4. Désurchauffe contrôlée

Certains procédés nécessitent une vapeur à température réduite sans modification significative de la pression. Le système intègre donc un désurchauffeur qui permet d'abaisser la température de la vapeur [13] :

- **Injection d'eau pulvérisée** via un gicleur commandé par une vanne motorisée.
- **Régulation automatique du débit d'eau** injecté en fonction de la température mesurée en sortie.
- **Prévention de la condensation excessive**, grâce à un dosage précis et une atomisation fine, évitant tout risque de choc thermique.

La température de la vapeur peut ainsi être réduite de 200 °C à environ 120 °C, en respectant les exigences des utilisateurs finaux.

II.2.5. Distribution de la vapeur

Une fois la vapeur traitée, elle est dirigée vers les unités consommatrices à travers un réseau de distribution conçu pour préserver ses caractéristiques thermodynamiques [13]:

- **Pression et température constantes**, adaptées aux contraintes des procédés.
- **Stabilité du débit**, même en cas de variation de la charge.
- **Tuyauterie calorifugée**, limitant les pertes thermiques et garantissant la sécurité du réseau.

Ce système assure un acheminement fiable et efficace de la vapeur, tout en minimisant les pertes énergétiques.

II.2.6. Sécurité intégrée

La maîtrise des risques est une priorité absolue dans un système manipulant de la vapeur sous haute pression [14] :

- **Soupapes de sécurité**, pour relâcher automatiquement la pression en cas de dépassement critique.
- **Systèmes anti-coup de bâlier**, assurant une transition progressive lors de la régulation ou de l'injection d'eau.

Ces mesures réduisent considérablement les risques d'accidents industriels.

II.2.7. Interface homme-machine (IHM)

L'interaction entre l'opérateur et le système passe par une IHM intuitive qui permet [14]:

- **La visualisation en temps réel** des données critiques (pression, température, état des vannes, alarmes).
- **Le contrôle manuel ponctuel**, en cas de maintenance ou de fonctionnement en mode dégradé.
- **L'historique des événements**, utile pour le diagnostic, la traçabilité et l'optimisation des performances.

Cette interface constitue un outil indispensable de supervision et de réactivité.

II.3. Visées Stratégiques de l'Automatisation du Système de Détente de Vapeur

Dans un contexte industriel moderne, la mise en œuvre d'un système automatisé vise à assurer un contrôle continu, une surveillance intelligente et une optimisation globale des procédés, tout en garantissant leur stabilité, leur sécurité et leur efficacité. Ces systèmes sont conçus pour limiter au maximum l'intervention humaine, tout en améliorant la régularité et la précision des opérations. Ils s'appuient sur une architecture comprenant des capteurs, des actionneurs, des dispositifs de commande et un automate programmable industriel (API), permettant une gestion dynamique des grandeurs critiques telles que la pression, la température ou le débit, et une réponse rapide aux variations de la demande ou des conditions de fonctionnement.

Dans le cas spécifique de la détente de vapeur, l'automatisation a pour finalité de réguler avec précision les paramètres thermodynamiques de la vapeur surchauffée, produite par les chaudières, avant sa distribution vers les unités consommatrices, telles que les raffineries de sucre ou d'huile. Cette régulation automatisée permet d'adapter en temps réel les caractéristiques de la vapeur aux exigences des procédés en aval, tout en évitant les écarts susceptibles de compromettre la qualité des produits, l'efficacité énergétique ou la sécurité des équipements.

La réussite de cette automatisation repose fondamentalement sur un cahier des charges bien conçu, qui constitue la pierre angulaire de toute la démarche. Un document rigoureusement élaboré permet de définir de manière claire les performances attendues, les contraintes opérationnelles, les normes de sécurité, ainsi que les critères d'interopérabilité avec les systèmes existants. Il oriente les choix techniques, notamment en matière de capteurs, d'actionneurs et de systèmes de supervision et garantit une intégration fluide et cohérente dans l'environnement industriel concerné. En outre, un bon cahier des charges assure l'alignement

entre les exigences fonctionnelles et les objectifs stratégiques, tout en favorisant l'optimisation des coûts, la fiabilité du système, et la conformité aux réglementations en vigueur.

Les objectifs principaux du système automatisé de détente de vapeur, tels qu'ils émergent de ce cahier des charges, peuvent être résumés comme suit :

- Réduire l'intervention manuelle grâce à une régulation autonome et intelligente ;
- Assurer une adaptation rapide aux variations de charge et aux besoins des unités consommatrices ;
- Garantir une gestion sécurisée de la détente de vapeur en toutes circonstances ;
- Maintenir une qualité de vapeur constante, adaptée aux spécifications des procédés en aval
- Intégrer les dispositifs de sécurité pour prévenir tout risque de surpression ou de dérive thermique ;
- Optimiser la consommation énergétique et réduire les pertes ;
- Offrir une supervision centralisée via une interface homme-machine intuitive et ergonomique.

Ainsi, l'automatisation du processus de détente de vapeur représente un levier stratégique pour accroître la performance de l'installation, améliorer sa fiabilité, et satisfaire aux standards industriels actuels en matière de sécurité, de productivité et de durabilité.

II.4. Description du système automatisé de détente de vapeur

Le système automatisé de détente de vapeur intégré au processus industriel repose sur une configuration optimale de chaudières à tubes de fumée, de dispositifs de mesure de performance, et de régulation thermique, le tout visant à offrir une distribution précise et fiable de la vapeur aux unités industrielles voisines. Ce système garantit l'efficacité énergétique et la sécurité dans les applications thermiques des raffineries de sucre et d'huile, où la vapeur joue un rôle crucial dans les processus de transformation.

II.4.1. Principe de fonctionnement des chaudières

Le système de chaudières illustré sur la **Figure II.1** repose sur un ensemble de quatre chaudières à tubes de fumée, chacune ayant une capacité de production de 40 tonnes de vapeur surchauffée par heure, à une pression de service de 13 bars et une température de 200 °C. Ces chaudières sont alimentées en eau provenant d'une bâche alimentaire centralisée, garantissant un approvisionnement en eau de qualité et en quantité suffisante pour le bon fonctionnement du système. Le processus de conversion commence par la combustion du combustible dans la chambre de foyer de chaque chaudière, ce qui génère des gaz chauds. Ces gaz circulent à travers des tubes immergés dans l'eau, permettant le transfert de chaleur par conduction thermique. Cela entraîne la production de vapeur saturée qui monte ensuite vers le dôme de la chaudière.

Cette vapeur saturée est acheminée vers un surchauffeur, où elle capte une chaleur supplémentaire, augmentant ainsi sa température au-delà du point de saturation. Elle devient ainsi une vapeur surchauffée, offrant un contenu énergétique plus élevé. La vapeur surchauffée est ensuite dirigée vers un collecteur central, où des transmetteurs de pression et de température assurent une surveillance continue de ses paramètres thermodynamiques. Ces instruments

permettent une régulation précise de la vapeur, garantissant une stabilité optimale et une performance énergétique maximisée.

Avant d'être envoyée vers les unités industrielles, la vapeur subit deux traitements cruciaux. La vapeur passe d'abord par une vanne de détente, qui réduit sa pression à un niveau stable et adapté aux besoins des processus en aval, permettant de maintenir une efficacité thermique tout en optimisant l'utilisation de la vapeur. Ensuite, la vapeur entre dans un désurchauffeur, équipé d'injecteurs d'eau pulvérisée. Ces injecteurs, régulés par un système de commande de pression, abaissent la température de la vapeur de 200 °C à environ 120 °C. Ce processus final permet de s'assurer que la vapeur est conforme aux exigences des applications industrielles, telles que la production de sucre et d'huile, garantissant ainsi un fonctionnement optimal des installations [12].

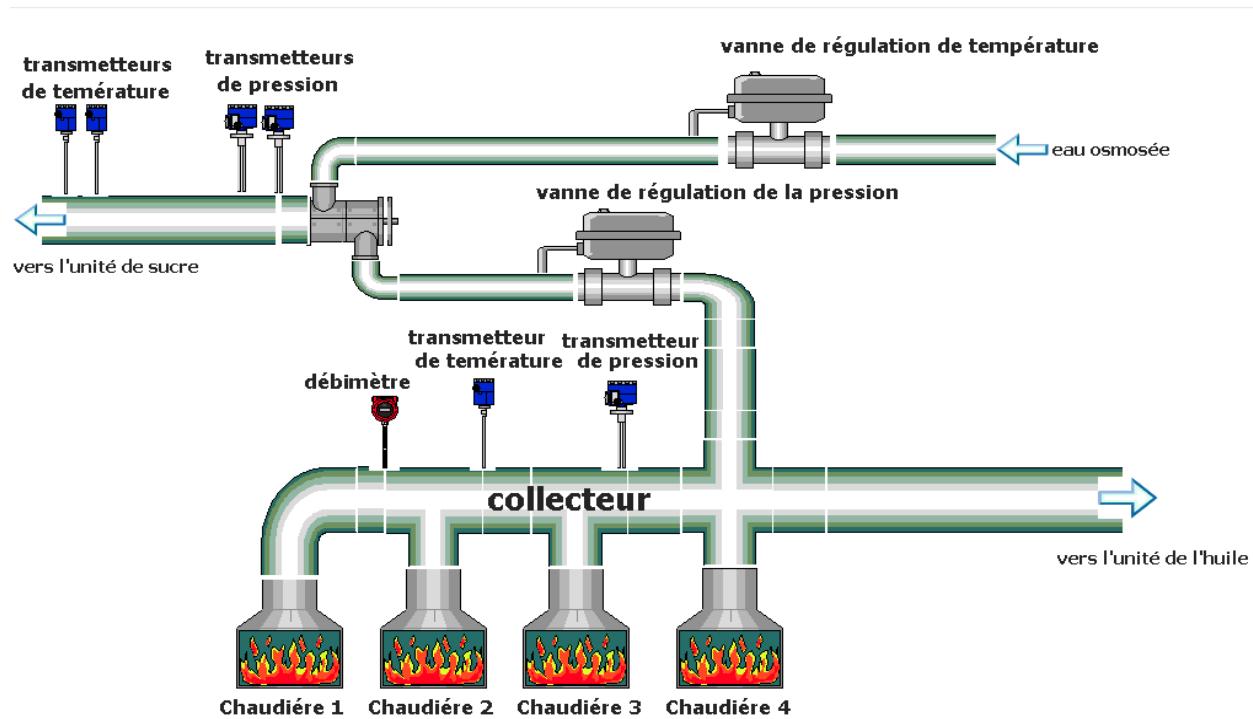


Figure II.1 : Architecture du circuit vapeur : de la chaudière à la distribution industrielle.

II.5. Les différentes vannes du procédé

II.5.1. Vanne à passage droit ou à passage équerre type 3595 :

La vanne type 3595 est une vanne à cage, conçue pour offrir à la fois robustesse, performance et facilité d'entretien. Elle convient aussi bien aux applications de régulation continue qu'au fonctionnement Tout ou Rien, même dans des environnements industriels exigeants. Particulièrement recommandée dans les secteurs pétroliers, gazier et dans les centrales thermiques à haute température, cette vanne est disponible en deux configurations [15] :

- à passage droit, favorisant un écoulement fluide et linéaire avec faible perte de charge ;
- à passage équerre, permettant un gain d'espace et une meilleure capacité de vidange, notamment dans les installations compactes ou complexes.

Cette flexibilité de conception permet une adaptation optimale aux contraintes spécifiques de chaque application industrielle.



Figure II.2 : Vanne de régulation type 3595 [15].

II.5.2. Caractéristiques

- Vanne à cage, disponible en version à passage droit ou à passage équerre, commandée par un servomoteur pneumatique.
- Adaptée pour les liquides et les gaz.
- Le clapet est guidé par la cage sur toute sa course pour plus de stabilité.
- Les vibrations sont réduites grâce au faible espace entre le clapet et la cage.
- Fonctionnement avec une caractéristique linéaire ou exponentielle.
- Débit (Cv) réduit, quelle que soit la taille de la vanne, pour une meilleure précision.
- Corps disponible en version à brides, à souder ou avec manchons à souder, selon le besoin.
- Compatible avec les servomoteurs type 3276 ou 3271, adaptés à chaque taille de vanne.
- Servomoteur à membrane, avec un ressort central ou plusieurs ressorts selon la configuration souhaitée
- Servomoteur à piston, au choix à double effet ou avec position de sécurité (par ressort central).
- Montage aisément des accessoires tels que des positionneurs, contacts de position et électrovannes.

II.5.3. Vanne type 3241

La vanne type 3241 est une vanne de régulation à simple siège, conçue pour assurer une régulation précise des débits de liquides, gaz ou vapeur, même dans des environnements industriels exigeants. Elle se distingue par sa construction robuste, sa fiabilité et sa facilité d'entretien [15].

Couramment utilisée dans les secteurs de la chimie, de l'énergie, de la pétrochimie et dans diverses industries de transformation, cette vanne est parfaitement adaptée aux conditions de service sévères, telles que les hautes pressions et températures élevées.

Elle est équipée d'un actionneur pneumatique à membrane, et peut fonctionner aussi bien en régulation modulante qu'en mode Tout ou Rien. En outre, elle offre plusieurs options de configuration :

- Types de cages de guidage selon les besoins d'amortissement ou de réduction de bruit,
- Types de bouchons (caractéristique linéaire, égal pourcentage, etc.),
- Matériaux (acier, inox, etc.) en fonction de la nature du fluide et des conditions d'exploitation.



Figure II. 3 : Vanne type 3241 avec servomoteur type 3271 [15].

II.6. Positionneur électropneumatique Type 3731-3 avec communication HART

Le positionneur électropneumatique Type 3731-3 de SAMSON est un dispositif de commande robuste, spécialement conçu pour une utilisation en zones explosives (certification ATEX). Il est équipé de la communication HART, ce qui permet la configuration, le diagnostic et la surveillance à distance. Ce positionneur est destiné aux vannes de régulation pneumatiques, à simple ou double effet, et assure un positionnement précis en fonction d'un signal de commande de 4 à 20 mA. Grâce à une adaptation automatique à la vanne et à son actionneur, il offre une mise en service rapide et fiable [15].

Le Type 3731-3 est compatible avec :

- des courses linéaires de 3,6 à 200 mm,
- ou des angles de rotation de 24 à 100°, ce qui le rend polyvalent pour différents types de vannes.

Il compare en continu la position réelle de la vanne (linéaire ou angulaire) avec la valeur de consigne reçue, et ajuste automatiquement la pression d'air de sortie pour atteindre la position souhaitée. Ce fonctionnement garantit un pilotage précis et stable, même dans des conditions industrielles difficiles.



Figure II. 4 : Positionneur électropneumatique Type 3731-3 avec Communication HART [15].

Le positionneur assure le positionnement précis de la vanne (grandeur réglée) en fonction du signal de commande reçu (grandeur directrice). Il compare en continu le signal envoyé par le dispositif de réglage à la position réelle de la vanne (déplacement linéaire ou angulaire), puis ajuste en conséquence la pression d'air de commande, qui constitue sa grandeur de sortie.

II.7. Régulation du processus vapeur : principes et mise en œuvre

La régulation du processus vapeur repose sur le maintien des paramètres thermodynamiques à des niveaux optimaux, malgré les perturbations. Elle s'appuie principalement sur des régulateurs PID en boucle fermée, assurant un ajustement continu et précis. Ce contrôle garantit la stabilité du système, la sécurité des équipements et la qualité du procédé.

II.7.1. Le rôle de la régulation

La régulation automatique a pour objectif principal d'assurer que le comportement d'un procédé ou d'un système reste conforme à des critères prédéfinis, malgré les perturbations et variations des conditions extérieures. Elle constitue un élément fondamental dans le contrôle des systèmes industriels et techniques, garantissant stabilité, performance et sécurité.

Cette régulation s'appuie essentiellement sur deux fonctions complémentaires [16] :

- Régulation en sens strict** : elle vise à maintenir la grandeur contrôlée (ou variable réglée) à une valeur de consigne fixe, en dépit des fluctuations externes ou internes qui pourraient l'en faire diverger. Ce type de régulation assure ainsi la stabilité et la précision du système autour de la valeur de référence.
- Fonction d'asservissement** : contrairement à la régulation en sens strict, l'asservissement permet à la grandeur réglée d'évoluer dynamiquement en fonction d'objectifs variables, ajustés en temps réel. Cela inclut notamment la poursuite de trajectoires, les modifications de consigne adaptatives, ou encore le suivi de cibles mobiles. Cette fonction est particulièrement utile dans les systèmes complexes nécessitant une adaptation continue à leur environnement ou à leur mission.

Ces deux fonctions, bien que distinctes, peuvent être combinées dans un même système pour optimiser la réponse aux exigences opérationnelles, en conciliant stabilité et flexibilité.

II.7.2. Boucle ouverte et boucle fermée

Dans la plupart des installations industrielles, tertiaires et domestiques, il est essentiel de maintenir des grandeurs physiques telles que la pression, la température ou le débit à des valeurs prédéfinies, malgré les perturbations internes ou externes. Celles-ci peuvent résulter de variations environnementales, de changements de charge ou de défaillances d'équipements.

Pour garantir la sécurité et la performance des procédés, la mise en place de systèmes de régulation adaptés s'impose, qu'ils soient en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans le cas de la vapeur, la pression doit être surveillée en continu et ajustée par des actions de commande précises, afin de rester dans une plage de fonctionnement optimale.

a. Réglage en Boucle Ouverte (B.O) :

Dans un système à boucle ouverte (B.O) (Figure II.5), la commande est appliquée sans tenir compte de la sortie réelle du procédé. Le fonctionnement repose uniquement sur un modèle préétabli, sans ajustement en fonction des résultats obtenus. Ce type de régulation est simple, rapide à mettre en œuvre et économique. Cependant, il ne permet pas de corriger les écarts causés par des perturbations ou des variations du système. Il convient uniquement aux procédés bien maîtrisés, peu sensibles aux changements et ne nécessitant pas de grande précision [17].

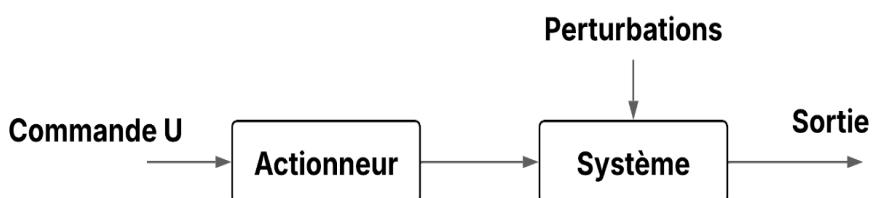


Figure II. 5 : Système en boucle ouverte.

La régulation en boucle ouverte présente plusieurs limites importantes :

- **Très sensible aux perturbations et erreurs** : sans mesure de la sortie, la régulation ne peut pas corriger automatiquement les écarts. Si quelque chose change dans le système ou si le modèle n'est pas exact, la régulation ne s'adapte pas et des erreurs persistent.
- **Performances fixes** : le temps de réponse et la façon dont le système réagit sont définis dès le départ et ne peuvent pas être modifiés sans intervention extérieure. Le système ne peut donc pas s'adapter à des changements ou des besoins différents.
- **Impossible de stabiliser les systèmes instables** : si le système est naturellement instable, la régulation en boucle ouverte ne pourra pas empêcher que les erreurs deviennent de plus en plus grandes, car il n'y a pas de retour pour corriger cela.

Pour toutes ces raisons, on utilise souvent la régulation en boucle fermée, qui mesure et ajuste en continu la sortie pour assurer un bon fonctionnement, même quand il y a des perturbations [17].

b. Réglage en boucle fermée (B.F) :

Quand un procédé n'est pas parfaitement connu ou qu'il subit des perturbations pouvant modifier son fonctionnement, la régulation en boucle ouverte ne suffit plus pour garantir que la sortie suive bien la valeur souhaitée (la consigne).

Pour y remédier, on utilise la boucle fermée : la grandeur de sortie est mesurée en permanence, puis comparée à la consigne. La régulation ajuste alors automatiquement la commande en fonction de l'écart entre la sortie réelle et la consigne. C'est ce qu'on appelle la rétroaction ou feedback.

La BF présente plusieurs avantages importants par rapport à la boucle ouverte :

- **Stabilisation des systèmes instables** : elle peut contrôler des systèmes qui, sans régulation, auraient un comportement instable.
- **Rejet des perturbations externes** : dès qu'une perturbation agit sur le système, elle est détectée rapidement grâce à la mesure de sortie et corrigée automatiquement.
- **Robustesse face aux incertitudes** : même si le procédé change ou que certaines données sont mal connues, la boucle fermée ajuste en temps réel la commande pour maintenir la sortie proche de la consigne [18]

En résumé, la régulation en boucle fermée assure un contrôle plus précis, stable et fiable, surtout quand les conditions ne sont pas parfaites.

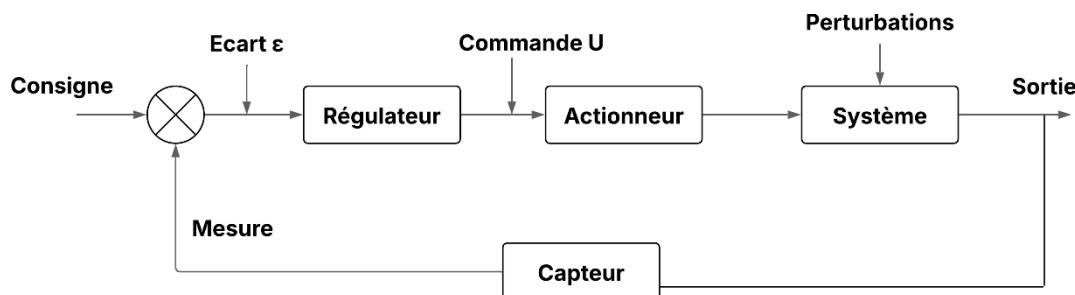


Figure II. 6 : Système en boucle fermée.

II.7.3. Régulateurs PID

Le régulateur PID (Proportionnel-Integral-Dérivé) est un des types de régulateurs les plus utilisés dans les systèmes à boucle fermée. Il sert à améliorer la précision et la stabilité du contrôle en adaptant la commande en fonction de l'erreur entre la valeur mesurée et la consigne. Ce régulateur agit grâce à trois composants principaux [19][20] :

1. **Proportionnel (P)** : ajuste la commande proportionnellement à l'erreur actuelle. Plus l'erreur est grande, plus la correction est forte.

$$P = K_P \varepsilon(t) \quad (II.1)$$

2. **Integral (I)** : s'intéresse à l'erreur accumulée dans le temps, ce qui permet d'éliminer l'erreur permanente (appelée erreur à l'état stationnaire).

$$I = \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(t) \quad (II.2)$$

3. **Dérivé (D)** : anticipe la tendance de l'erreur en se basant sur sa variation rapide, ce qui aide à réduire les dépassemens et améliore la stabilité.

$$D = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (II.3)$$

Le régulateur PID génère ainsi un signal de commande qui combine ces trois actions pour corriger la sortie du système et la rapprocher de la consigne. Cependant, pour fonctionner correctement, les paramètres associés à ces trois termes (appelés coefficients PID) doivent

être bien réglés, car un mauvais choix peut entraîner un mauvais comportement, comme des oscillations ou une lenteur dans la réponse.

Le régulateur PID est apprécié en industrie pour sa simplicité, son efficacité sur une large gamme de processus et sa capacité à compenser différents types de perturbations.

Dans sa forme classique, le signal de commande $Y(t)$ est calculé à partir de l'erreur $\varepsilon(t)$

$$Y(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d \varepsilon(t)}{dt} \right) \quad (\text{II.4})$$

Avec l'écart défini comme suit :

$$\varepsilon(t) = w(t) - S(t) \quad (\text{II.5})$$

Sa fonction de transfert s'écrit :

$$G_c(s) = \frac{Y(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (\text{II.6})$$

où K_p , T_i et T_d sont respectivement le gain proportionnel, temps d'intégration et temps de dérivation, $W(t)$ la consigne et $S(t)$ la sortie.

II.7.4. Méthode de calcul des paramètres d'un régulateur PID

a. La méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée (méthode du point critique)

La méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée est une technique simple pour régler les paramètres d'un régulateur PID. Elle repose sur la recherche du point critique où le système commence à osciller de façon stable.

Pour cela, on configure le système avec un régulateur proportionnel seul (sans action intégrale ni dérivée) et on augmente progressivement le gain proportionnel. Lorsque le système entre en oscillations continues et régulières, on atteint la limite de stabilité [19].

À ce stade, on mesure deux grandeurs importantes :

- Le gain critique K_{cr} : la valeur du gain proportionnel à laquelle apparaissent ces oscillations.
- La période critique T_{cr} : la période des oscillations observées.

Ces deux valeurs servent ensuite à calculer les paramètres du régulateur PID (gain proportionnel K_p , intégral K_i et dérivé K_d) en utilisant les formules du tableau de Ziegler-Nichols, qui propose des réglages standards selon le type de contrôleur souhaité (P, PI ou PID).

Cependant, les paramètres calculés peuvent parfois provoquer des réponses trop agressives ou instables. Il est donc courant d'ajuster manuellement certains paramètres, notamment en réduisant le gain intégral K_i , pour améliorer la stabilité et la qualité de la régulation.

Tableau II.1 : Ajustage de gain du régulateur P, PI et PID selon la méthode de Ziegler-Nichols en BF

Type de régulateur	K_p	T_i	T_d
P	0.5*K_{cr}	-	-
PI	0.4* K_{cr}	0.83*T_{cr}	-
PID	0.6*K_{cr}	0.5*T_{cr}	0.125*T_{cr}

b. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte (ou méthode de la réponse indicielle)

La méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte consiste à tracer la tangente au point a méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte est utilisée pour déterminer les paramètres d'un régulateur PID à partir de la réponse indicielle (réponse à un échelon) du système, sans fermer la boucle de régulation [20].

Elle se déroule en plusieurs étapes :

- Appliquer un échelon d'entrée au système
- Tracer la courbe de réponse de la sortie du système.
- Identifier le point d'inflexion de la courbe (point où la courbure change).
- Tracer la tangente en ce point d'inflexion.
- Mesurer deux paramètres :
 - Le temps mort T_u : le temps entre l'application de l'échelon et l'intersection de la tangente avec l'axe des abscisses (temps de retard pur).
 - Le temps de montée ou temps de réponse T_g : le temps entre T_u et l'atteinte du régime, lié à la pente de la tangente.

Une fois T_u et T_g déterminés, on utilise les formules empiriques proposées par Ziegler et Nichols pour calculer les paramètres du régulateur PID (ou PI ou P), Le tableau ci-dessous résume les réglages typiques.

Tableau II.2 : Ajustage de gain de régulateur P, PI et PID selon la méthode de Ziegler-Nichols en B.O

Type de régulation	K_p	T_i	T_d
P	T_g/T_u	-	-
PI	0.9*(T_g/T_u)	3.3*T_u	-
PID	1.2*(T_g/T_u)	2.0*T_u	0.5*T_u

II.7.5. Système de régulation de vapeur

Le système de régulation de la vapeur et de la température repose sur un principe simple et structuré en quatre étapes clés : mesurer, comparer, agir et communiquer. Ce processus est illustré dans la figure ci-dessous.

- **Mesure :**

La mesure de la grandeur physique (comme la pression ou la température) est assurée par un ensemble capteur-transmetteur. Le capteur détecte la valeur de la variable, tandis que le transmetteur la convertit en un signal normalisé (généralement de 4 à 20 mA). Ce

signal est calibré, linéarisé, puis envoyé au régulateur afin de garantir une lecture précise, fiable et continue.

- **Comparaison et décision :**

La valeur mesurée est comparée en temps réel à la consigne définie par l'opérateur. Cette opération est effectuée par un régulateur PID, qui calcule automatiquement la commande optimale pour corriger l'écart (erreur) entre la mesure et la consigne, tout en compensant les perturbations éventuelles.

- **Action :**

Le signal de commande généré par le régulateur agit sur une vanne de régulation. En modulant l'ouverture de cette vanne, on modifie la variable manipulée (par exemple, le débit de vapeur), ce qui permet de ramener la variable contrôlée (température ou pression) à la valeur souhaitée.

- **Communication et supervision :**

Une interface de communication, intégrée au régulateur et reliée à un écran de supervision, permet à l'opérateur de surveiller en temps réel les paramètres du système : consigne, valeur mesurée et commande. Cela facilite le suivi du processus et l'ajustement des réglages si nécessaires.

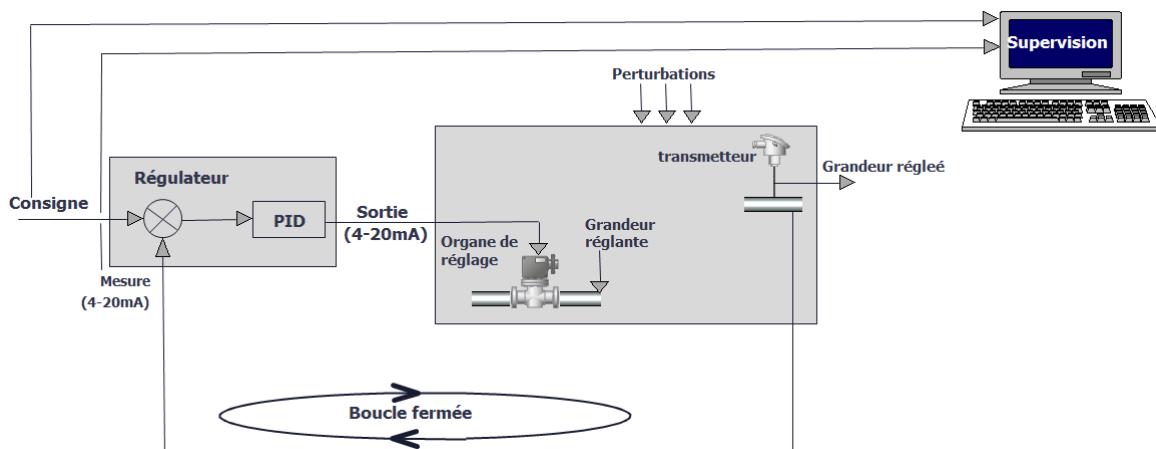


Figure II.7 : Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation vapeur/température.

II.7.6 Critères de performance d'une régulation

Les critères de performance d'une régulation permettent de juger si le système réagit bien. On observe le temps de réponse, le dépassement, le temps de stabilisation et l'erreur finale. L'objectif est d'avoir une réponse rapide, précise et stable.

a. Précision

La précision d'un système de régulation, définie dans l'équation (II.5) comme l'écart entre la consigne et la réponse réelle, se mesure par la capacité du système à minimiser cette erreur. Plus le système est précis, plus l'erreur $\varepsilon(t)$ reste proche de zéro, aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent.

La **Figure II.8** illustre cette notion : la **courbe bleue** (système précis) atteint rapidement la consigne avec un léger dépassement, puis se stabilise exactement à la bonne valeur, l'erreur finale est donc nulle. En revanche, la **courbe rouge** (système non précis) monte lentement et se stabilise à une valeur inférieure à la consigne, ce qui signifie qu'une **erreur permanente**

subsiste. Cela montre que la boucle fermée permet d'améliorer la précision d'un système par rapport à une régulation moins performante.

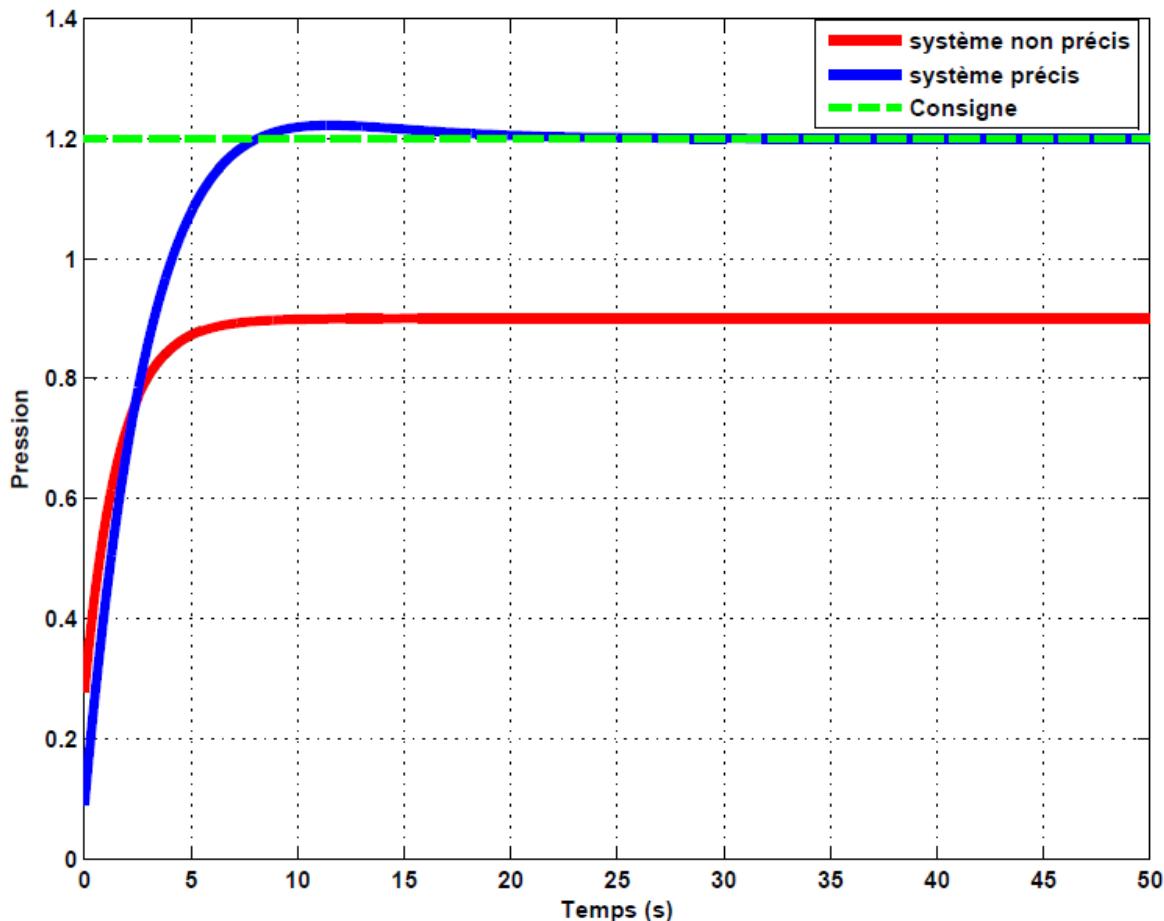


Figure II.8 : Comparaison entre système précis et système non précis.

b. Rapidité

La rapidité d'un système correspond à sa capacité à atteindre la consigne le plus vite possible sans trop d'hésitation. On mesure cela à l'aide du temps de réponse t_s , qui est le temps nécessaire pour que la sortie $S(t)$ entre dans une zone autour de la consigne (généralement $\pm 5\%$) et y reste sans en sortir.

Plus ce temps est court, plus le système est dit rapide. Cela signifie qu'il se stabilise vite, ce qui est souvent essentiel dans les applications industrielles.

La **figure II.9** montre deux systèmes :

- **La courbe en bleu** atteint rapidement la consigne → il est **rapide**.
- **La courbe en rouge** met plus de temps à se stabiliser → il est **lent**.

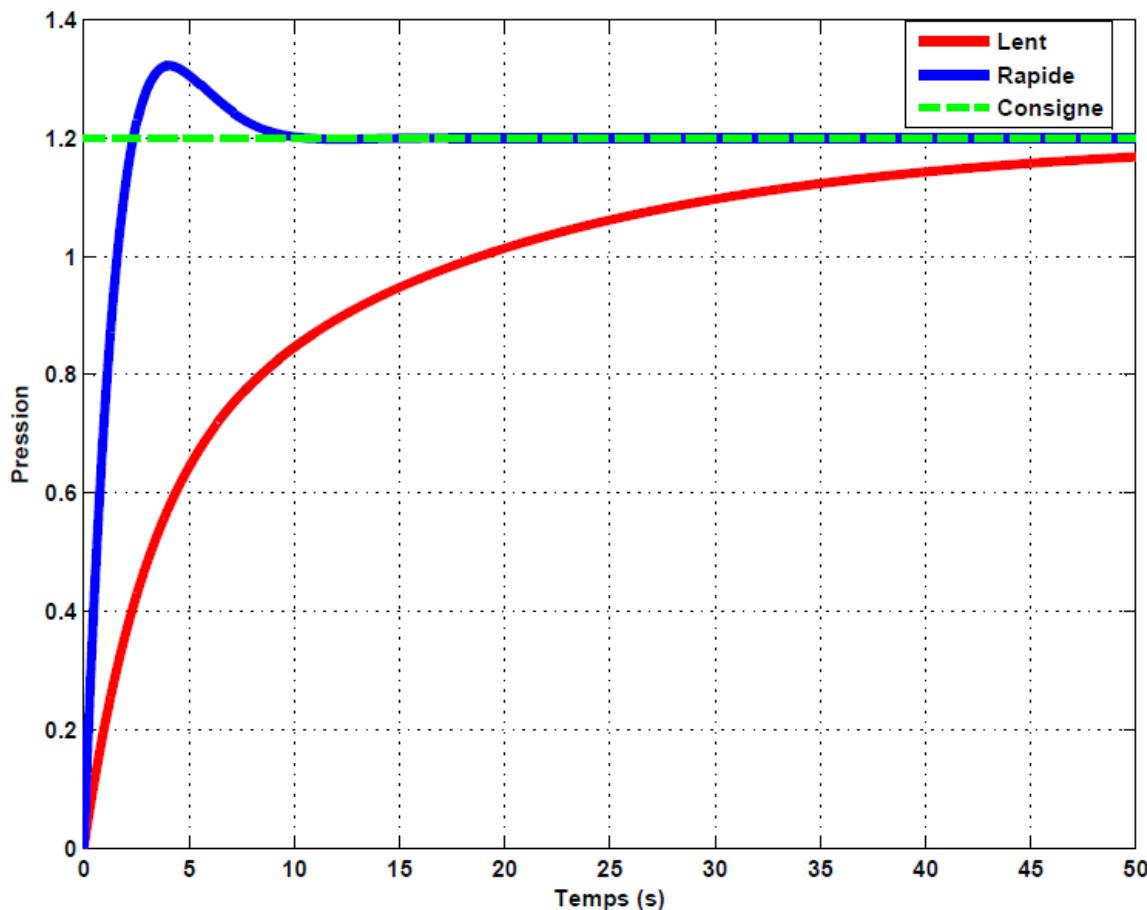


Figure II.9 : réaction dynamique (Système rapide et système lent).

c. Stabilité

La stabilité d'un système de régulation est une propriété essentielle qui définit sa capacité à atteindre et conserver une valeur de sortie constante lorsque l'entrée du système reste fixe. Plus précisément, un système stable est capable de revenir spontanément à son point d'équilibre après une perturbation temporaire, sans oscillations croissantes ni dérives intempestives.

En d'autres termes, si une perturbation, qu'elle soit due à un changement brusque de consigne, une variation de charge, ou un bruit extérieur affecte le système, ce dernier doit impérativement s'auto-corriger pour retrouver son état d'équilibre initial, garantissant ainsi la fiabilité et la précision du régulateur.

Cependant, la stabilité seule ne suffit pas à garantir un fonctionnement satisfaisant en conditions réelles. La robustesse du système, c'est-à-dire sa capacité à conserver cette stabilité malgré des variations de paramètres, des incertitudes dans le modèle ou des perturbations imprévues, est également cruciale. Cette robustesse est assurée par des marges de sécurité dites marge de gain et marge de phase :

- La marge de gain représente la quantité de gain supplémentaire que le système peut tolérer avant de devenir instable.
- La marge de phase indique la quantité de décalage de phase admissible avant l'apparition d'instabilité.

Ces marges sont des indicateurs clés pour concevoir un régulateur fiable, capable de rester stable dans un environnement dynamique et incertain.

La **Figure II.10** illustre de manière visuelle ce concept fondamental de stabilité. Elle montre typiquement :

- La réponse temporelle d'un système stable : après une perturbation, la sortie oscille éventuellement avec une amplitude décroissante jusqu'à atteindre une valeur constante fixe, appelée point d'équilibre.
- L'absence de dérive ou d'oscillations croissantes, ce qui caractérise un système instable.
- La notion de point d'équilibre stable, où la sortie du système se stabilise en l'absence de perturbations.

La **Figure II.10** illustre la réponse temporelle de deux comportements typiques d'un système de régulation soumis à une perturbation, représentés par deux courbes de couleurs différentes :

- **Courbe bleue (stable)** : Cette courbe montre que la sortie du système, après une perturbation, revient progressivement à une valeur constante. Les oscillations, si elles existent, décroissent avec le temps, ce qui reflète un amortissement efficace. Cela indique que le système est stable : il peut maintenir une sortie fixe lorsque l'entrée est constante, même après un choc temporaire.
- **Courbe rouge (instable)** : Cette courbe illustre un comportement instable où la sortie ne converge pas vers une valeur fixe. Au contraire, les oscillations s'amplifient ou la sortie diverge, signe que le système ne retrouve pas son équilibre. Ce comportement révèle un système incapable de compenser la perturbation, menant à une perte de contrôle.

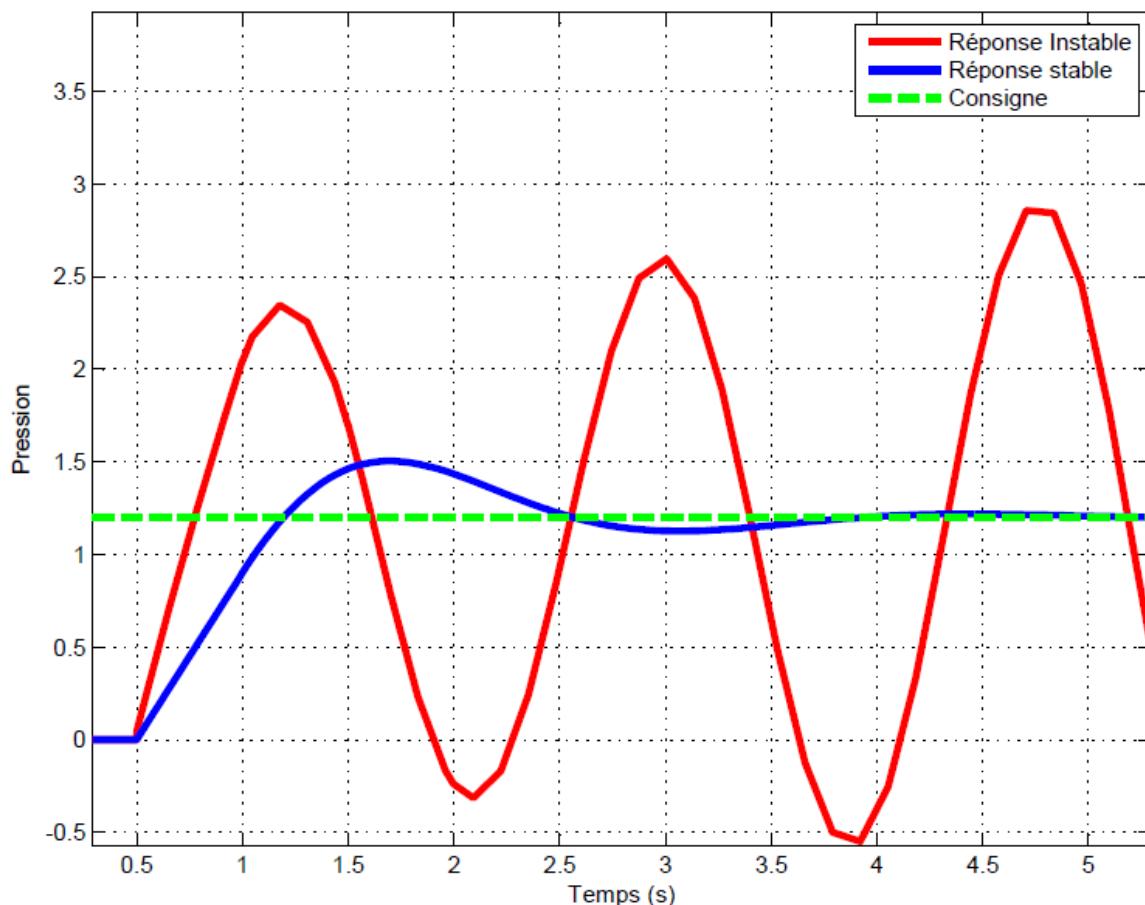


Figure II.10 : Comportements stables et instables d'un système après perturbation.

II.8. Système de sécurité et surveillance en temps réel

II.8.1. Méthode de détection de rupture de câble et de basculement automatique entre transmetteurs

Cette méthode repose sur une surveillance continue de la valeur mesurée par le transmetteur. Si cette valeur sort de la plage admissible (-1728 à 29380), cela signale une anomalie, telle qu'une rupture de câble ou un défaut du capteur. Le système déclenche alors automatiquement le basculement vers un second transmetteur.

L'architecture redondante intégrant deux transmetteurs de pression et deux de température assure ainsi une continuité du processus sans interruption, même en cas de défaillance d'un capteur.

Cette stratégie présente plusieurs avantages :

- Elle permet d'éviter les arrêts imprévus en maintenant le système opérationnel malgré une rupture ou un dysfonctionnement.
- Elle renforce la fiabilité du système en détectant rapidement les pannes, ce qui empêche l'introduction de données erronées dans la boucle de régulation.
- Elle reste simple à mettre en œuvre, en se basant uniquement sur une comparaison directe des valeurs mesurées, sans recourir à des modèles mathématiques complexes ou à des observateurs.

II.8.2. Surveillances en temps réel

a. Visualisation en direct des alarmes et de l'état des régulations

À intervalles très courts, le poste de supervision interroge automatiquement les automates pour collecter l'état des boucles de régulation ainsi que les indicateurs d'alarme. Les données recueillies sont aussitôt affichées sur l'interface graphique sous forme de représentations dynamiques : couleurs de statut, pictogrammes clignotants, schémas animés, etc.

Ce dispositif visuel permet à l'opérateur de détecter immédiatement toute valeur anormale ou tout dysfonctionnement du procédé, assurant ainsi une réaction rapide en cas d'écart ou d'incident.

b. Commande manuelle des vannes en cas de besoin

Lorsque la pression dépasse un seuil critique, la logique de supervision active automatiquement un bouton virtuel sur l'interface homme-machine (IHM), permettant à l'opérateur de passer la vanne en mode manuel.

Ce basculement manuel est accompagné d'une confirmation visuelle claire (changement de couleur, message ou indicateur actif), afin de garantir que l'opérateur a bien pris le contrôle de la vanne en toute sécurité.

c. Affichage des courbes de tendance des deux vannes

L'IHM met à disposition des graphiques de tendance affichant à la fois les courbes en temps réel et les données historiques, avec la superposition des deux signaux de position de la vanne.

L'utilisateur peut ajuster l'intervalle d'affichage et zoomer sur des plages temporelles spécifiques, ce qui permet une analyse fine de la corrélation entre les variations de pression et les commandes appliquées à la vanne.

II.9. Organigramme de fonctionnement

L'organigramme de fonctionnement présenté par la **Figure II.11** illustre de manière claire et séquentielle les différentes étapes du processus automatisé de production, régulation et distribution de vapeur dans le système étudié. Ce schéma représente la logique de commande, les contrôles de sécurité et les actions de régulation indispensables au bon fonctionnement de l'installation.

- **Initiation du système**

L'organigramme débute par la mise sous tension du système automatisé. Cette étape d'initialisation consiste à activer l'ensemble des composants matériels et logiciels essentiels : chaudières, transmetteurs de pression et de température, unités de commande et régulation. Elle garantit que tous les équipements sont prêts et fonctionnels avant de lancer la production, assurant ainsi un démarrage sûr et efficace.

- **Vérification des conditions de démarrage**

Avant toute mise en production, le système contrôle automatiquement plusieurs paramètres critiques : la disponibilité de l'eau dans la bâche d'alimentation, l'état opérationnel des chaudières, ainsi que le bon fonctionnement des transmetteurs. Cette vérification permet de s'assurer que les conditions minimales de sécurité et de performance, notamment la pression et la température minimales, sont respectées. En cas de non-conformité, le système bloque la progression pour éviter tout risque.

- **Production de vapeur surchauffée**

Après validation des conditions initiales, le processus démarre la génération de vapeur. Les chaudières à tubes de fumée brûlent le combustible nécessaire pour chauffer l'eau osmosée et produire une vapeur surchauffée à haute pression et température, formant ainsi la source énergétique principale du système.

- **Contrôle de la pression minimale**

Le système mesure la pression de la vapeur générée. Si la pression est inférieure à une valeur minimale prédéfinie (P_{min}), un ajustement est demandé ou une alarme est émise. Cette étape garantit que la vapeur produite possède une pression suffisante pour un fonctionnement correct et sécurisé des équipements en aval.

- **Contrôle de la pression maximale de sécurité**

Pour prévenir les dangers liés à une surpression, une limite maximale de sécurité ($P_{max_sécurité}$) est définie. Si la pression excède ce seuil, une alarme est déclenchée et des dispositifs automatiques de protection, tels que l'ouverture des soupapes de sécurité, sont activés afin de ramener la pression dans des limites sûres.

- **Régulation PID de la pression via la vanne de détente**

Le système met en œuvre un contrôle automatique avancé de la pression grâce à un régulateur PID. Ce dernier ajuste la position de la vanne de détente pour réduire la pression de la vapeur d'environ 13 bars à une pression de consigne plus basse (environ 1,2 bars). Le régulateur agit en boucle fermée, intégrant les actions proportionnelle, intégrale et dérivée pour stabiliser précisément la pression malgré les fluctuations de charge ou de production.

- **Validation de la pression de consigne**

Le système vérifie que la pression obtenue est bien proche de la valeur cible ($P_{consigne}$). Si la pression est dans une plage acceptable, le processus peut continuer vers la régulation de la température. Sinon, le régulateur ajuste la vanne ou signale un problème, garantissant ainsi la fiabilité du contrôle.

- **Contrôle de la température maximale de sécurité**

Similairement à la pression, la température de la vapeur est surveillée pour éviter tout dépassement d'une limite critique ($T_{max_sécurité}$). En cas de dépassement, une alarme est activée pour éviter tout risque de surchauffe.

- **Régulation PID de la température via la vanne régulatrice**

Le système abaisse la température de la vapeur en injectant de l'eau via un désurchauffeur. Un régulateur PID ajuste le débit d'eau par une vanne régulatrice en fonction des retours des transmetteurs de température, abaissant ainsi la température de 200°C à une température de consigne aux alentours de 120°C. Ce contrôle évite les phénomènes de condensation excessive et les chocs thermiques.

- **Validation de la température de consigne**

Le système s'assure que la température est bien conforme à la consigne (T_{consigne}). Si la température est correcte, la vapeur est considérée prête pour la distribution. Sinon, des ajustements ou alertes sont déclenchés pour maintenir la qualité et la sécurité du produit final.

- **Acheminement de la vapeur vers les unités de production**

Enfin, la vapeur régulée à 1,2 bars et environ 120°C est acheminée via des tuyauteries calorifugées vers les différentes unités industrielles, telles que les raffineries de sucre et d'huile, où elle sera utilisée pour les procédés thermiques nécessaires.

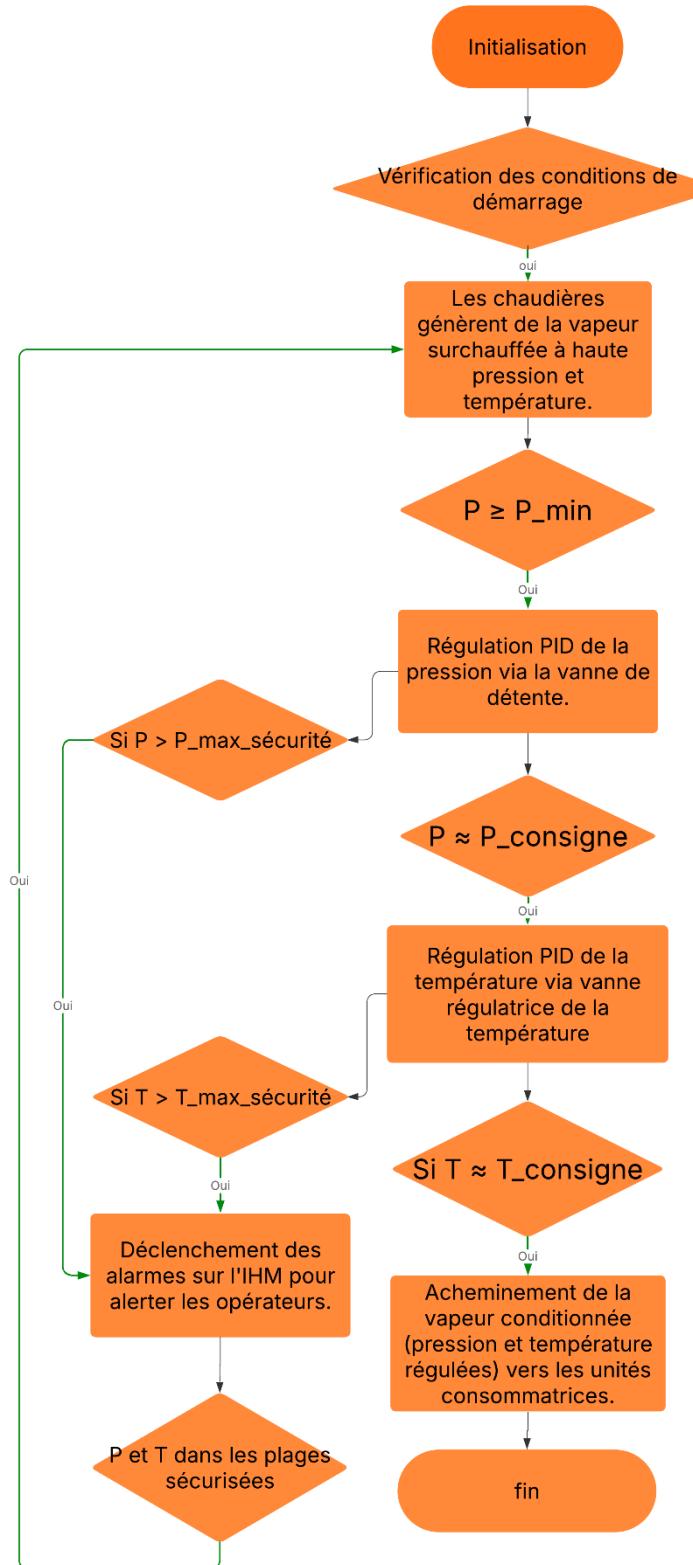


Figure II.11 : Diagramme de fonctionnement du système de production et régulation automatique de vapeur

II.10. Synthèse des besoins en régulation et contraintes de mise en œuvre

II.10.1. Exigences fonctionnelles clés

- **Production de vapeur surchauffée contrôlée**

Le système doit générer de la vapeur surchauffée respectant des conditions précises de pression, température et débit, adaptées aux besoins des unités industrielles consommatrices.

- **Régulation dynamique des paramètres**

La pression et la température de la vapeur doivent être ajustées en continu, de façon automatique, pour s'adapter aux variations des besoins en aval, garantissant ainsi une production stable et efficace.

- **Détente de pression stable et contrôlée**

Il est indispensable de réduire la pression de la vapeur de manière précise et automatique, passant d'environ 13 bars à 1,2 bars, grâce à une vanne de détente dont la commande doit être fiable et rapide.

- **Désurchauffe maîtrisée par injection d'eau**

La température élevée de la vapeur (environ 200°C) doit être abaissée à environ 120°C par injection contrôlée d'eau pulvérisée, évitant ainsi la formation excessive de condensation qui pourrait endommager le système.

- **Supervision et contrôle en temps réel**

Une surveillance permanente des paramètres critiques (pression, température, débit, position des vannes) est nécessaire, via des capteurs et une interface homme-machine (IHM) qui facilite le suivi et l'intervention rapide.

- **Gestion flexible des modes de fonctionnement**

Le système doit pouvoir fonctionner en mode automatique avec régulation PID, tout en offrant la possibilité d'un contrôle manuel ponctuel, notamment pour les opérations de maintenance ou en cas de dysfonctionnement.

II.10.2. Performances attendues

- **Maintien précis des consignes**

Le système doit assurer que la pression et la température restent proches des valeurs fixées, même en cas de perturbations ou de changements dans la demande.

- **Stabilité du contrôle**

La régulation doit être stable, sans fluctuations ou oscillations trop importantes, pour garantir un fonctionnement fluide et sécuritaire.

- **Précision élevée**

Le contrôle de la pression et de la température doit être suffisamment précis pour assurer la qualité optimale de la vapeur destinée aux unités comme les raffineries de sucre et d'huile.

- **Fiabilité et continuité**

Le système doit fonctionner de façon fiable et continue, en minimisant les interruptions imprévues grâce notamment à la redondance des capteurs et à une détection rapide des défauts.

II.10.3. Limitations et défis de mise en œuvre

a. **Choix des équipements adaptés**

Il faut sélectionner des transmetteurs, actionneurs (comme les vannes) et automates

programmables (API) capables de résister aux conditions sévères de pression et température, tout en garantissant la précision et la rapidité requises pour la régulation.

b. Fiabilité des mesures

La qualité de la régulation dépend fortement de la fiabilité des capteurs. Il est essentiel d'assurer une détection rapide des pannes (rupture de câble, défaillance) et de pouvoir basculer automatiquement vers des capteurs de secours pour éviter toute interruption.

c. Interface Homme-Machine ergonomique

L'IHM doit être claire et intuitive afin que les opérateurs puissent facilement superviser le système, détecter rapidement les anomalies et intervenir efficacement en cas de problème.

II.11. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de formaliser les exigences fonctionnelles ainsi que les principes essentiels de commande du système automatisé de détente de vapeur. La présentation détaillée du procédé, l'analyse des régulations PID, et la description des dispositifs de sécurité et de surveillance en temps réel ont été traitées avec rigueur. L'organigramme de fonctionnement a mis en exergue la séquence précise des opérations de contrôle. Par ailleurs, la synthèse des besoins et contraintes techniques a souligné les principaux enjeux liés à la mise en œuvre du système. Ces éléments constituent le socle théorique nécessaire à la phase d'implémentation. Le chapitre suivant sera dédié à la réalisation pratique et à la validation du système au sein de l'environnement TIA Portal.

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

III.1. Introduction

Ce chapitre présente l'implémentation de la régulation de la détente vapeur à l'aide du logiciel TIA Portal V15. Après la création du projet, les composants nécessaires ont été configurés et intégrés dans une architecture modulaire, structurée autour de blocs de programme. La régulation PID a été développée conformément aux exigences fonctionnelles du système. La supervision du procédé est assurée par une interface homme-machine conçue sous WinCC. L'ensemble du programme a été simulé à l'aide de PLC Sim, afin de valider le comportement du système dans un environnement virtuel. Les résultats obtenus permettent d'évaluer la performance et la cohérence de la stratégie de régulation mise en œuvre. Les principales étapes de programmation, de supervision et de validation sont détaillées dans ce chapitre.

Partie I : Analyse et programmation

III.2 Crédation et configuration de l'environnement de développement

III.2.1 Crédation du projet

Notre projet a été créé et validé en utilisant le logiciel TIA Portal V15.1. Pour réaliser ce travail dans cet environnement, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

- Lancer TIA Portal V15.1
- Cliquer sur "Créer un nouveau projet".

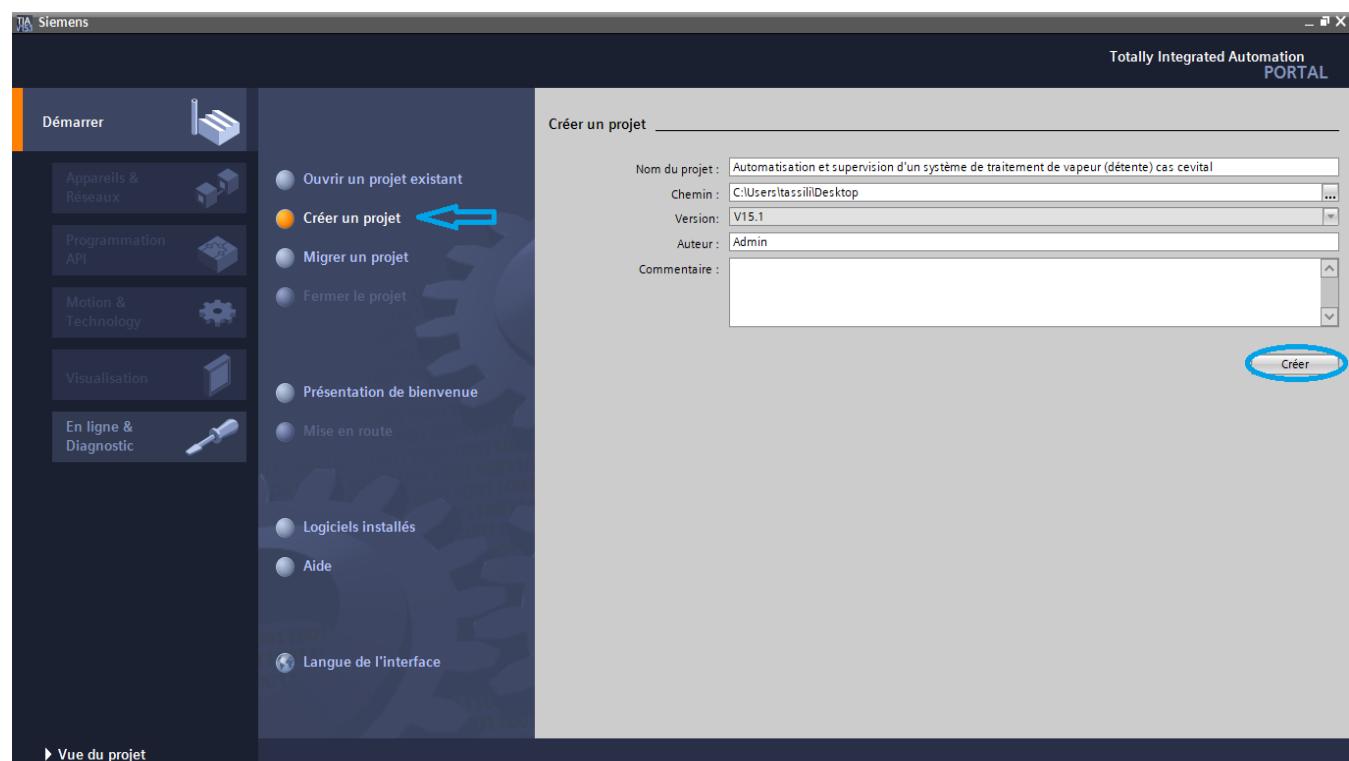


Figure III. 1 : Crédation d'un projet sur TIA Portal.

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

- **Nom du projet** : Saisir le nom « Automatisation et supervision d'un système de traitement de vapeur (détente) ».
- Cliquer sur **"Créer"**.
- Une fois le projet créé, cliquer sur **"Configurer un appareil"**.

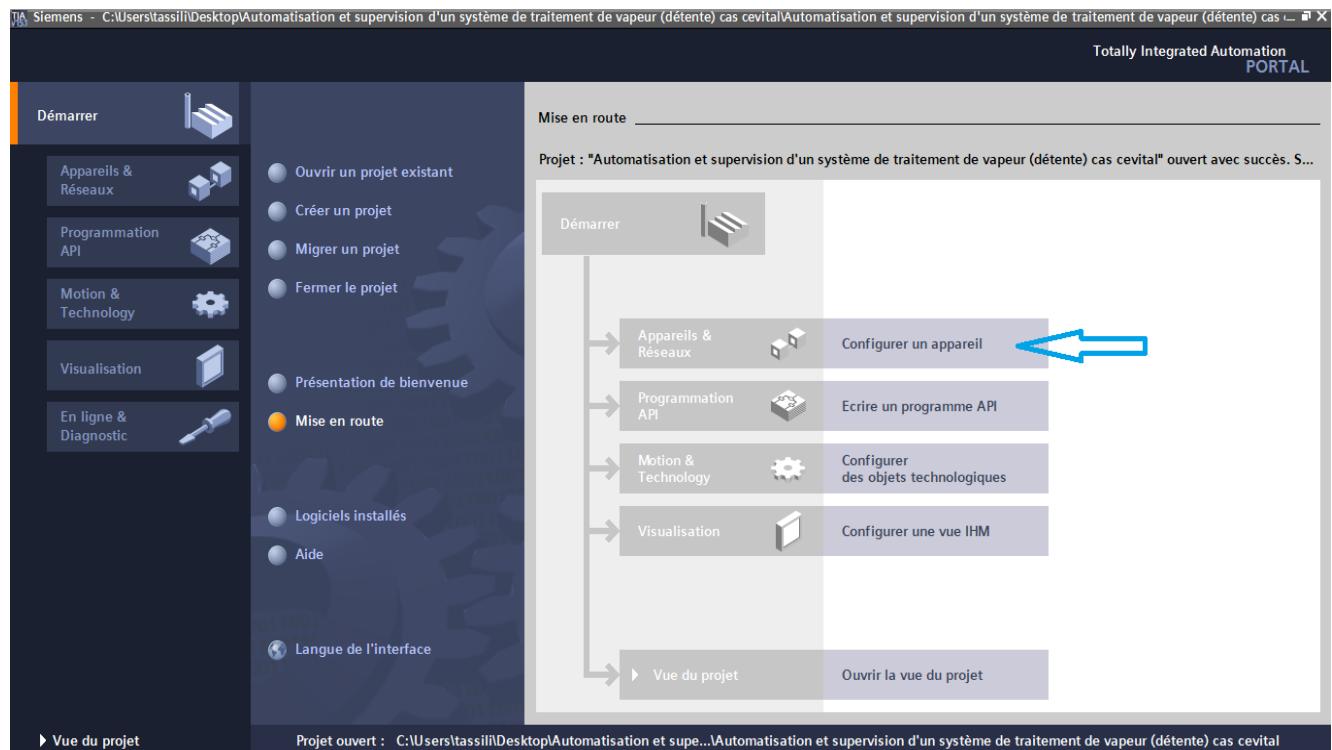


Figure III.2 : Configurer un appareil.

III.2.2 Configuration matériel

Cette étape est réalisée à partir de l'environnement TIA Portal, en accédant à la vue projet, puis en sélectionnant l'option « Ajouter un appareil » via le navigateur de projet. Le logiciel propose alors une liste d'équipements disponibles, incluant notamment :

- Les automates programmables industriels (API) ;
- Les interfaces homme-machine (IHM) ;
- Les systèmes de type PC industriels.

Dans notre cas, la configuration débute par l'ajout du contrôleur principal. Les étapes suivantes sont les suivantes :

1. Sélection de la famille d'automates : SIMATIC S7-300 ;
2. Choix du modèle de CPU : CPU 313C (référence 6ES7 313-5BG04-0AB0) ;
3. Validation de l'ajout de l'appareil via le bouton "OK".

Une fois l'automate intégré au projet, plusieurs étapes de configuration sont nécessaires pour compléter l'architecture matérielle :

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détent de vapeur sous TIA

1. Dans le navigateur de projet, sélectionner l'automate, puis accéder à la "Vue de réseau" afin de vérifier ou configurer l'adresse IP de la CPU.
2. Basculer vers l'onglet "Vue de périphérie" pour l'ajout des modules complémentaires nécessaires au fonctionnement du système.
3. Insérer les modules d'entrées/sorties numériques (DI 24/DO 16)
4. Ajouter les modules analogiques (AI 5/AO 2), le cas échéant, notamment pour la lecture ou le pilotage de variables analogiques telles que la pression ou la température.

Pour chaque module ajouté, il est possible d'accéder à ses propriétés afin de définir manuellement l'adressage des entrées/sorties, sinon celui-ci est attribué automatiquement par TIA Portal (**Figure III. 3**)

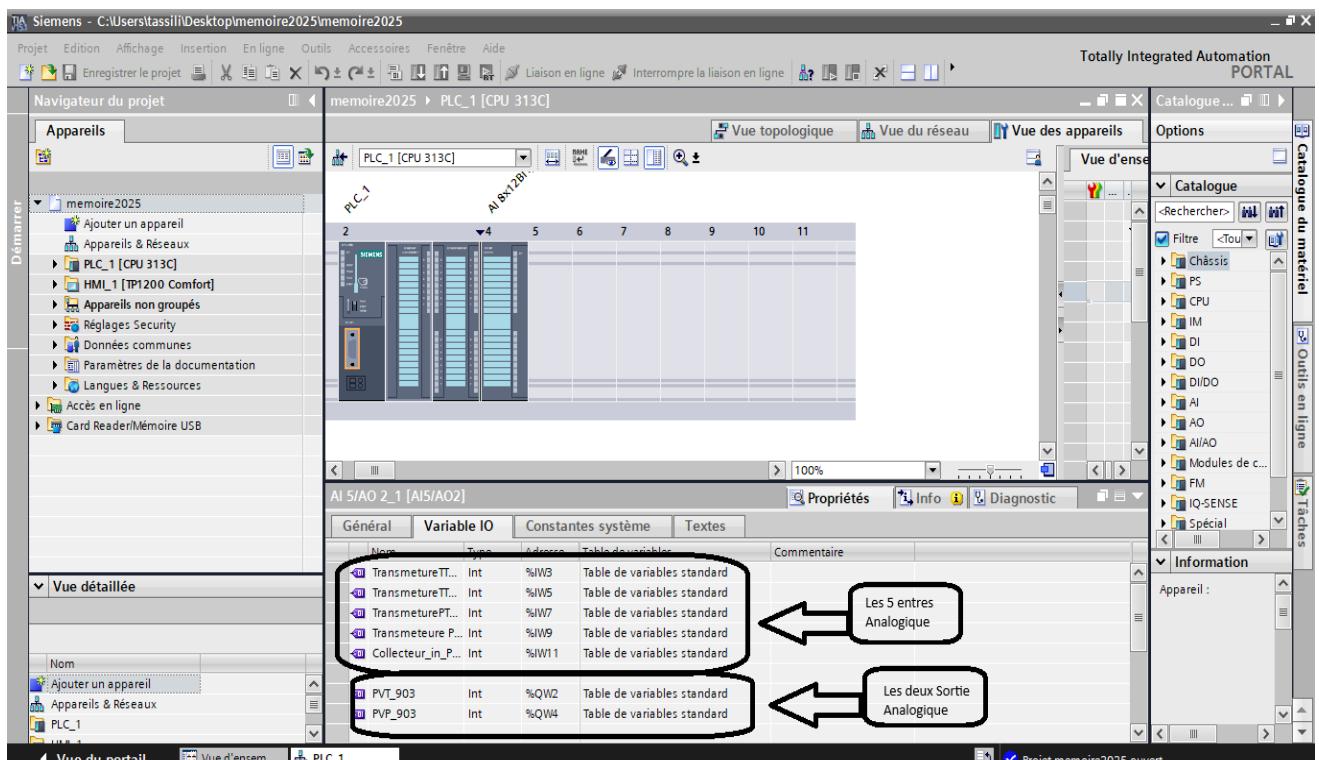


Figure III. 3 : Choix des modules.

III.3. Adressage des E/S (Table des variables)

La première étape avant la programmation dans TIA Portal consiste à déclarer toutes les variables dans la table « **Variables API** », en précisant pour chacune un nom symbolique, une adresse mémoire spécifique (par exemple, %IW3, %QW2, %M0.1, etc.) et un type de données.

Cette déclaration organise la gestion des données entre le programme principal et les périphériques. Chaque variable du système est ainsi clairement identifiée, qu'il s'agisse des points d'entrée/sortie ou des variables internes, ce qui facilite leur adressage et leur utilisation dans le programme, comme le montre la table des variables (**Figure III.4**).

Variables API								
	Nom	Table des variables	Type de données	Adresse	Réma...	Acces...	Visibl...	Commentaire
1	TransmetureTT124.1	Table de variables	Int	%IW3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	TransmetureTT124.2	Table de variables	Int	%IW5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	TransmeturePT124.1	Table de variables	Int	%IW7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	TransmeturePT124.2	Table de variables	Int	%IW9		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Collecteur_in_PT126	Table de variables	Int	%IW11		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	debit_in_FT126	Table de variables	Int	%IW13		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	POS_in_PV903	Table de variables	Int	%IW15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	POS_in_TV903	Table de variables	Int	%IW17		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	PVT_903	Table de variables	Int	%QW2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	PVP_903	Table de variables	Int	%QW4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	Tag_1	Table de variables	Bool	%M0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	SELECTMAN	Table de variables	Bool	%M0.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	SELECTIONNEUR	Table de variables	Bool	%M0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	SELECTMAN_PRESSION	Table de variables	Bool	%M0.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	Tag_2	Table de variables	Bool	%M0.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
16	<Ajouter>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figure III. 4 : Table des variables API : Adressage des entrées-sorties.

III.4. Conception du programme principal :

Après avoir déclaré les variables nécessaires dans la table des Variables, la phase suivante consiste à créer le programme principal, structuré autour d'un bloc Main dédié au régulateur. Ce bloc est complété par des sous-blocs :

- Un bloc d'alarme cyclique (OB35) assurant la surveillance périodique du système,
- 12 fonctions (FC) permettant de modulariser les différentes opérations,
- 3 blocs de données globales (DB) pour le stockage et l'échange des informations essentielles, notamment BD_Pression, BD_Température et un bloc de données générique (Bloc de données_1).

Cette architecture modulaire favorise la clarté, la maintenance et l'évolutivité du programme. L'ensemble des noms symboliques, types de données et blocs utilisés est détaillé dans l'annexe 1.2.3.4, tandis que la table des variables API et les blocs de données sont présentés dans l'annexe 5.

III.4.1. Bloc des entrées analogiques (Mise à l'échelle)

Dans notre premier réseau [FC1], l'instruction **SCALE** joue un rôle essentiel pour la conversion des données analogiques brutes issues des capteurs en valeurs physiques réelles et exploitables par le système. Cette instruction prend en entrée une valeur numérique entière (IN), généralement représentative du signal mesuré par un capteur, et la convertit en une valeur réelle exprimée dans une unité physique compréhensible, ici le degré Celsius (°C).

Les bornes de conversion sont définies par l'utilisateur : une limite basse (LO_{LIM}) fixée à 0°C et une limite haute (HI_{LIM}) fixée à 300,0 °C. Le paramètre **BIPOLAR** indique si la plage

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

d'entrée peut inclure des valeurs négatives, ce qui est le cas pour certains signaux bipolaires. L'instruction produit en sortie (OUT) la valeur convertie, prête à être utilisée dans le programme automate.

Ainsi, l'instruction **SCALE** assure la traduction précise d'une donnée brute en une mesure physique directement exploitable pour le contrôle ou la régulation, garantissant la cohérence entre le signal mesuré et la représentation réelle du phénomène physique.

L'équation de mise à l'échelle utilisée est la suivante :

$$OUT = \frac{FLOAT(IN) - K1}{K2 - K1} * (HI_{LIM} - LO_{LIM}) + LO_{LIM} \quad (\text{III.1})$$

Les valeurs des constantes **K1** et **K2** dépendent de l'état logique du paramètre **BIPOLAR**, qui peut prendre deux états possibles :

- **État logique 1** : la valeur du paramètre **IN** est bipolaire, c'est-à-dire qu'elle peut varier entre -27648 et +27648. Dans ce cas, **K1** est fixé à -27648 et **K2** à +27648.
- **État logique 0** : la valeur du paramètre **IN** est unipolaire, ce qui signifie qu'elle varie entre 0 et +27648. Ici, **K1** vaut 0 et **K2** vaut +27648 [21].

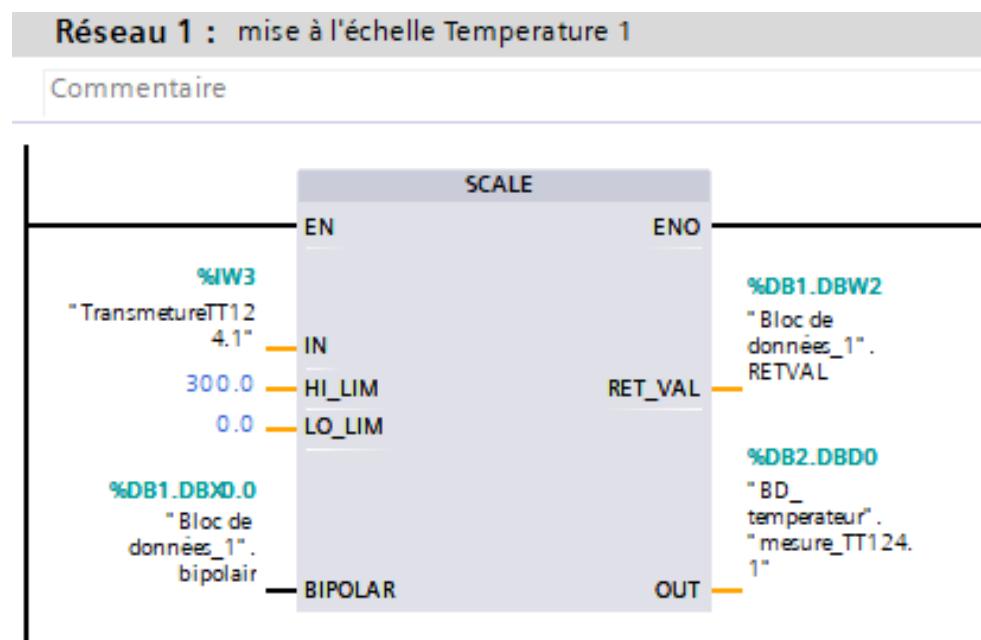


Figure III. 5 : Bloc des entrées analogiques

Plusieurs blocs SCALE sont utilisés pour assurer la conversion des valeurs brutes en grandeurs physiques exploitables dans différents modules fonctionnels. Ainsi, deux blocs SCALE sont dédiés à la conversion des mesures de température dans le [FC1], tandis que deux autres blocs similaires sont intégrés dans le [FC2]. Par ailleurs, un bloc SCALE est affecté à la mise à l'échelle de la pression du collecteur dans le [FC3], un autre à la conversion du débit dans le [FC4], un bloc SCALE pour la position de la vanne de pression dans le [FC5], et enfin un bloc dédié à la position de la vanne de température dans le [FC6].

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

Cette répartition permet une gestion modulaire et précise des différentes grandeurs physiques mesurées et contrôlées par le système.

III.4.2. Bloc des sorties analogiques (Annuler mise à l'échelle) :

Dans le premier réseau d'un autre bloc fonctionnel [FC7], l'instruction **UNSCALE** est utilisée pour convertir une valeur de pression réelle, comprise entre une limite basse (**LO_LIM**) de 0 et une limite haute (**HI_LIM**) de 100, en une valeur brute adaptée à une sortie analogique. Cette conversion permet de piloter un actionneur, tel qu'une vanne, en fonction de la pression mesurée.

La valeur en sortie (OUT) correspond alors à la valeur numérique proportionnelle destinée à la commande de la vanne, exprimant par exemple son pourcentage d'ouverture. Le paramètre **BIPOLAR** détermine si la conversion doit considérer la possibilité de valeurs négatives.

L'instruction « Annuler mise à l'échelle » repose sur l'équation suivante :

$$OUT = \frac{IN - LO_{LIM}}{HI_{LIM} - LO_{LIM}} * (K2 - K1) + K1 \quad (\text{III.2})$$

Si la valeur du paramètre **IN** se situe en dehors des limites définies par **LO_LIM** et **HI_LIM**, une erreur est générée et le résultat est automatiquement contraint à la borne la plus proche. Par ailleurs, si la limite inférieure (**LO_LIM**) est supérieure à la limite supérieure (**HI_LIM**), la mise à l'échelle est effectuée de manière inverse, c'est-à-dire que la sortie varie inversement par rapport à l'entrée.

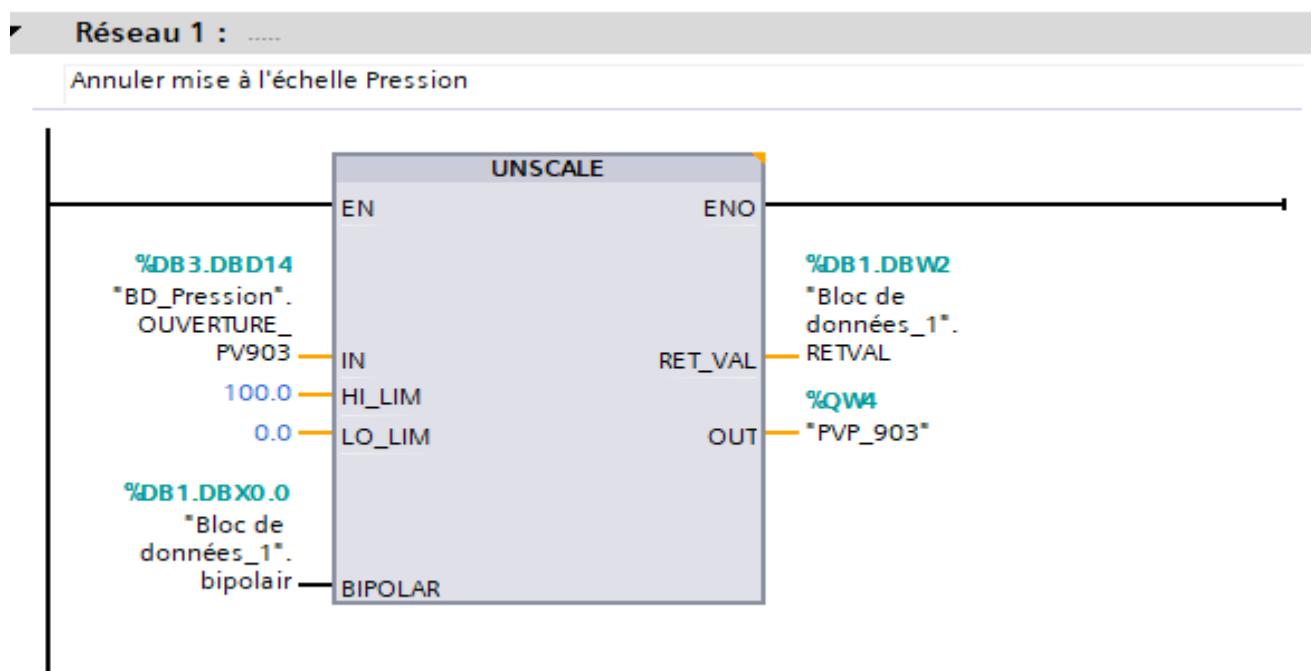


Figure III.6 : Bloc des sorties analogiques

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

L'instruction **UNSCALE**, chargée d'effectuer l'opération inverse de la mise à l'échelle, a été utilisée à **deux reprises** dans le programme :

- **Première utilisation** : dans le bloc fonctionnel **[FC7]**, pour convertir une **valeur réelle de température** en une valeur brute destinée à une sortie analogique.
- **Deuxième utilisation** : dans le bloc fonctionnel **[FC8]**, pour convertir une **valeur réelle de pression** en une valeur brute exploitée par le système.

III.4.3. Programmation du mode Manuelle/Automatique

Le système peut fonctionner selon deux modes distincts :

- **Mode manuel** : l'intervention de l'opérateur est requise. La commande des vannes s'effectue manuellement via un clic sur le bouton « mode manuel », permettant une ouverture ou fermeture directe selon les besoins.
- **Mode automatique** : le processus est entièrement géré par l'automate. Les vannes s'ouvrent et se ferment automatiquement en fonction des mesures relevées et des consignes programmées, sans action humaine.

III.4.4. Programmation du mode de sélection entre les transmetteurs

a. Bloc de sélectionneur manuel :

Dans un autre bloc fonction, nommé « **Sélectionneur manuel de température** », l'instruction **SEL Real** est utilisée pour choisir entre deux valeurs de température. Cette instruction reçoit deux entrées, **IN0** et **IN1**, reliées respectivement aux variables **BDtempérature.Mesure_TT124.1** et **BD température.Mesure_TT124.2**, puis transfère l'une d'elles vers la sortie **OUT**, connectée à **BD température.Mesure_TT124**. La sélection entre **IN0** et **IN1** est pilotée par l'entrée de sélection **G**, contrôlée par la variable **SELECT_MAN** :

- Si **SELECT_MAN** est à **FAUX**, la sortie prend la valeur de **Mesure_TT124.1**.
- Si **SELECT_MAN** est à **VRAI**, la sortie prend la valeur de **Mesure_TT124.2**.

Ainsi, la température choisie est disponible via la variable **BD température.Mesure_TT124**.

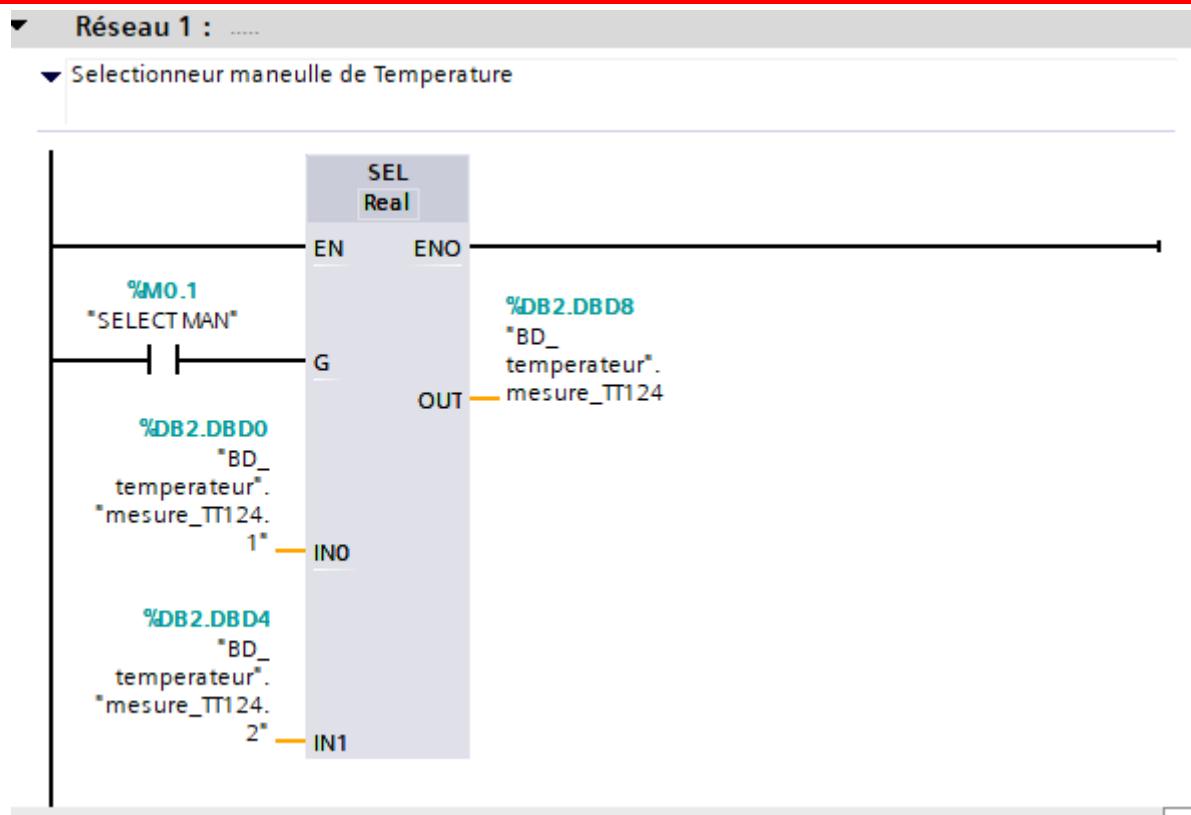


Figure III.7 : Bloc de sélecteurs manuelle

Ensuite, un bloc fonction [FC9] a été ajouté pour intégrer spécifiquement deux sélecteurs manuels : le premier permet de choisir une valeur de température, le second de sélectionner une valeur de pression.

b. Bloc de Sélectionneur Automatique :

Ce sélecteur automatique est conçu pour renforcer la fiabilité du système de mesure en cas de rupture de fil sur un transmetteur de température. Il permet une bascule immédiate et sans intervention manuelle vers une mesure alternative issue d'un transmetteur de secours, garantissant ainsi la continuité du contrôle du procédé.

Comme l'illustre la **figure** du réseau « *cas de rupture fil du transmetteur de température 1* », une logique de diagnostic est appliquée à la valeur brute du transmetteur principal **TransmetteurTT124.1**, reçue sur l'entrée analogique **%IW3**. Cette valeur est comparée à des seuils définissant une plage de fonctionnement valide (comprise entre **-1728** et **29380**). Si la mesure se situe à l'intérieur de cette plage, le signal est considéré comme correct ; autrement, une anomalie est suspectée. Le résultat de cette vérification conditionne le bit booléen **BD_température.rupture_TT124.1**, qui reflète l'état du capteur.

Dans le réseau « *Sélectionneur automatique de Température 1* » (**Figure III. 8**), ce bit est utilisé comme condition d'activation du bloc fonction **MOVE**. Lorsque **BD_température.rupture_TT124.1** est à **faux**, indiquant une rupture de signal, le bloc **MOVE** est alors activé. Ce dernier copie automatiquement la valeur de température lue par le transmetteur de secours (**BD_température.mesure_TT124.2**) dans la variable principale **BD_température.mesure_TT124**, qui est utilisée en aval pour la régulation du processus.

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détection de vapeur sous TIA

Ce mécanisme, simple et efficace, permet donc une commutation automatique entre deux sources de mesure en cas de défaillance du capteur principal. Il assure une continuité opérationnelle optimale et préserve la qualité et la fiabilité des données mesurées, même en situation de panne.

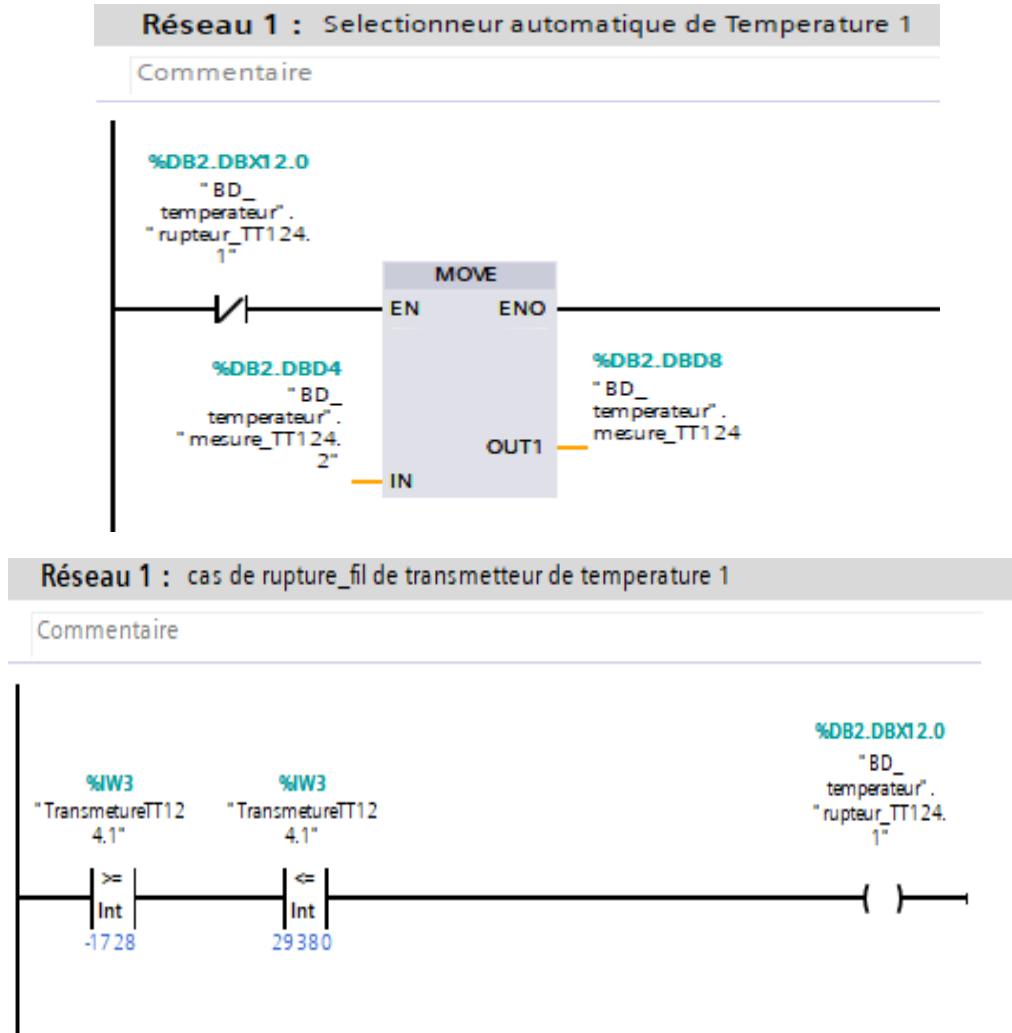


Figure III. 8 : Bloc de Sélectionneur Automatique

III.4.5. Bloc de donnée DB

Le bloc de données (Data Block – DB) constitue une zone mémoire dédiée au sein de l'automate programmable, permettant le stockage structuré de variables nécessaires à l'exécution du programme d'automatisation. Il est couramment utilisé pour mémoriser des paramètres tels que les consignes, les seuils de déclenchement ou encore les états intermédiaires du processus, assurant ainsi la persistance et la cohérence des informations tout au long du fonctionnement du système (Figure III. 9).

	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Valeur de ..	Commentaire
1	Static							
2	mesure_TT124.1	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
3	mesure_TT124.2	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
4	mesure_TT124	Real	8.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	rupteur_TT124.1	Bool	12.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
6	rupteur_TT124.2	Bool	12.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
7	OUVERTURE_TV903	Real	14.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
8	mesure_Positon de la ..	Real	18.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	TT124	Real	22.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
10	rupteur_pos_tempéra...	Bool	26.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		

Figure III. 9 : Bloc de donnée DB

III.4.6. Bloc Fonctions (FC)

Le bloc fonctionnel (Function Block _FB) (**Figure III. 10**) est utilisé pour développer des parties de programme qui nécessitent une mémorisation de l'état d'exécution. Contrairement à une fonction simple, il conserve les valeurs internes d'un cycle à l'autre grâce à une mémoire propre, ce qui le rend particulièrement adapté aux traitements séquentiels ou aux opérations nécessitant une continuité. Chaque fois qu'un FB est utilisé, une instance lui est associée, permettant de gérer séparément les données pour chaque appel. Ce principe assure une meilleure organisation du programme, tout en facilitant la réutilisation de blocs logiques dans différents contextes sans perte d'informations.

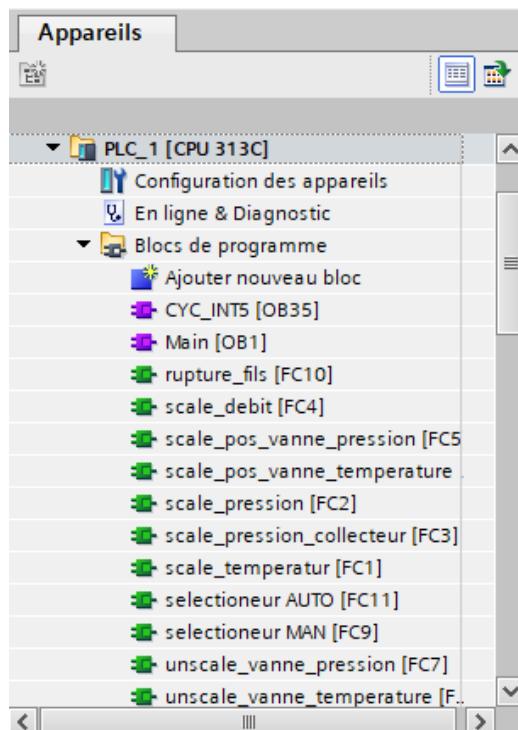


Figure III. 10 : Bloc Fonctions (FC)

III.4.7. Bloc de régulation CONT_C :

Le bloc de régulation **CONT_C**, comme présenté dans la **Figure III. 11**, est un régulateur PID standard utilisé dans les environnements d'automatisation sous TIA Portal. Son rôle est d'assurer un contrôle précis du processus en ajustant la variable réglant pour maintenir la grandeur contrôlée proche de la consigne souhaitée.

a. Paramètres d'entrées :

Avant de pouvoir assurer un fonctionnement optimal du régulateur PID dans un environnement automatisé, il est nécessaire de configurer correctement l'ensemble des paramètres d'entrée du bloc fonction utilisé. Le régulateur PID de l'automate S300 comprend 35 paramètres d'entrée/sortie. Dans notre cas, nous avons utilisé un régulateur PID configuré à l'aide de 13 paramètres d'entrée. (présentés dans le Tableau III.2) et 8 paramètres de sortie (présentés dans le Tableau III.3).

Le Tableau III.2 donne une description générale de ces paramètres, incluant leur type de données, leur valeur par défaut ainsi que leur rôle spécifique dans le comportement du régulateur. Cette configuration initiale permet de définir les conditions de démarrage, les modes de fonctionnement (manuel ou automatique), les caractéristiques des actions PID ainsi que les limites, les facteurs d'échelle et les options de compensation des signaux.

Tableau III.1 : Paramètres d'entrée du régulateur PID

Paramètre	Type de données	Valeur par défaut	Description
MAN_ON	BOOL	TRUE	La mise à 1 de l'entrée "activation du mode manuel" interrompt la boucle de régulation. C'est une valeur manuelle qui est introduite comme valeur de réglage.
P_SEL	BOOL	TRUE	Dans l'algorithme PID, les actions PID peuvent être activées et désactivées individuellement. L'action P est active quand cette entrée est à 1.
I_SEL	BOOL	TRUE	Dans l'algorithme PID, les actions PID peuvent être activées et désactivées individuellement. L'action I est active quand cette entrée est à 1.
D_SEL	BOOL	FALSE	Dans l'algorithme PID, les actions PID peuvent être activées et désactivées individuellement. L'action D est active quand cette entrée est à 1.
CYCLE	TIME	T#1s	Le temps entre deux appels du bloc doit être constant. Il est indiqué par cette entrée. CYCLE >= 1ms
SP_INT	REAL	0.0	L'entrée "consigne interne" permet de spécifier une consigne. Les valeurs autorisées sont comprises entre -100 et 100 ou une grandeur physique 1).
PV_IN	REAL	0.0	L'entrée "Entrée mesure" permet de paramétriser une valeur de mise en service ou d'interconnecter une mesure externe au format en virgule flottante. Les valeurs autorisées sont comprises entre -100 et 100 ou une grandeur physique 1).

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

MAN	REAL	0.0	Cette entrée sert à introduire une valeur manuelle grâce à des fonctions de contrôle-commande. Les valeurs autorisées sont comprises entre -100 et 100 ou une grandeur physique 2).
GAIN	REAL	2.0	L'entrée "Coefficient d'action proportionnelle" indique le gain du régulateur.
TI	TIME	T#20s	L'entrée "Temps d'intégration" détermine la réponse temporelle de l'intégrateur. TI >= CYCLE
TD	TIME	T#10s	L'entrée "Temps de dérivation" détermine la réponse temporelle du déivateur. TD >= CYCLE
LMN_HLM	REAL	100.0	La valeur de réglage possède toujours une limite supérieure et inférieure. L'entrée "Limitation supérieure de la valeur de réglage" indique sa limitation supérieure. Les valeurs autorisées sont des valeurs réelles à partir de LMN_LLM (%) ou une grandeur physique 2).
LMN_LLM	REAL	0.0	La valeur de réglage possède toujours une limite supérieure et inférieure. L'entrée "Limitation inférieure de la valeur de réglage" indique sa limitation inférieure. Les valeurs autorisées sont des valeurs réelles jusqu'à LMN_HLM (%) ou une grandeur physique 2).

b. Paramètres de Sorties :

Les paramètres de sortie permettent de surveiller le fonctionnement du régulateur en fournissant des informations clés telles que la valeur de réglage, les contributions des actions PID, la mesure réelle et le signal d'écart

Tableau III. 2 : Paramètres de sortie du régulateur PID

Paramètre	Type de données	Valeur par défaut	Description
LMN	REAL	0.0	La valeur de réglage effective en format à virgule flottante est fournie à la sortie "valeur de réglage".
QLMN_HLM	BOOL	FALSE	La valeur de réglage possède toujours une limite supérieure et inférieure. La sortie "Limite supérieure de la valeur de réglage accostée" signale que la limite supérieure est atteinte.
QLMN_LLM	BOOL	FALSE	La valeur de réglage possède toujours une limite supérieure et inférieure. La sortie "Limite inférieure de la valeur de réglage accostée" signale que la limite inférieure est atteinte.
LMN_P	REAL	0.0	La sortie "action P" correspond à l'action proportionnelle de la variable réglante.
LMN_I	REAL	0.0	La sortie "action I" correspond à l'action d'intégration de la variable réglante.
LMN_D	REAL	0.0	La sortie "action D" correspond à l'action de dérivation de la variable réglante.
PV	REAL	0.0	La mesure opérante est fournie à la sortie "Mesure".

ER	REAL	0.0	Le signal d'écart opérant est fourni à la sortie "Signal d'écart".
----	------	-----	--

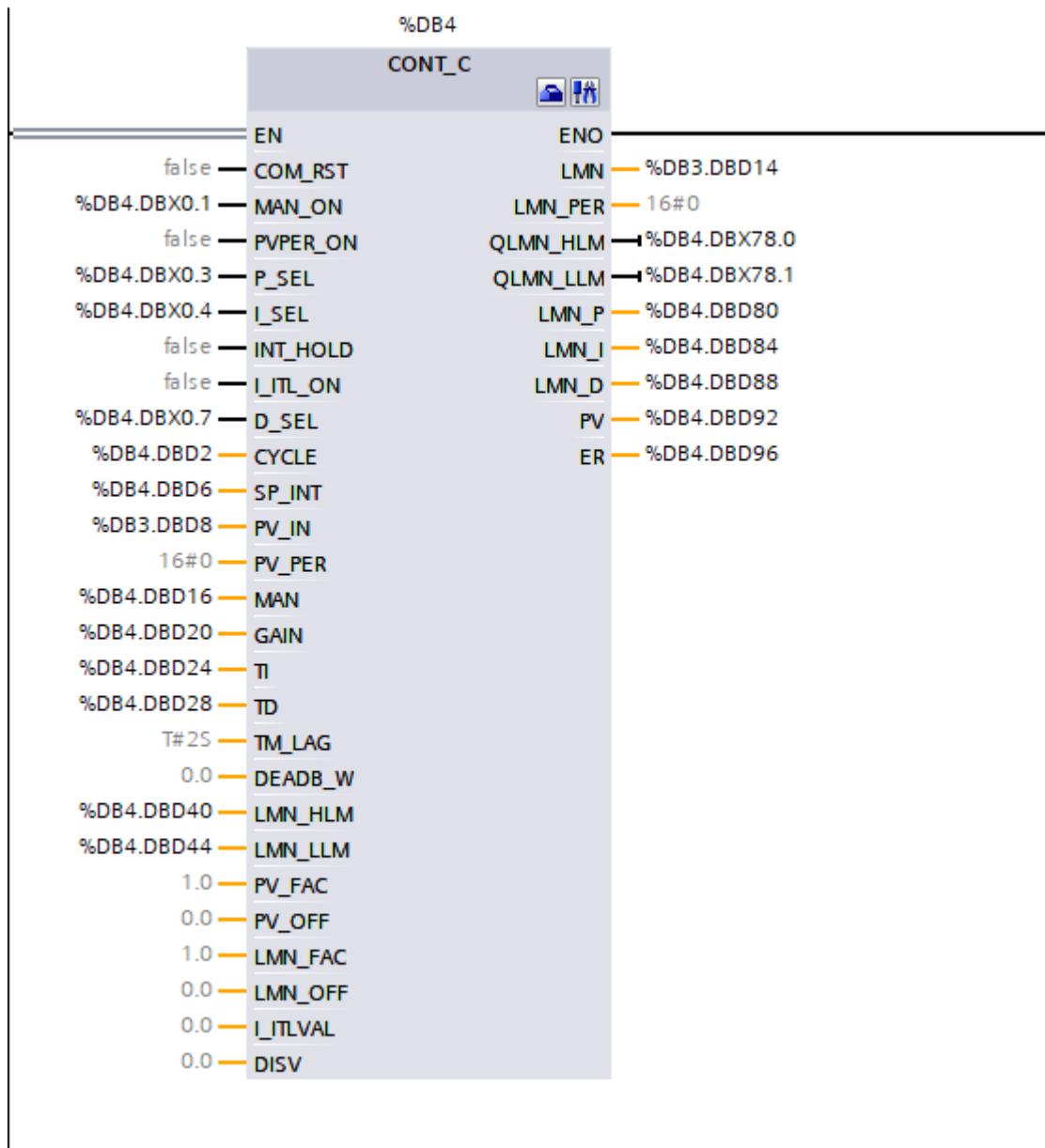


Figure III. 11 : Bloc de régulation CONT_C

Partie II : IHM et supervision

III.5. Crédation d'une IHM

La création de l'interface homme-machine (IHM) se déroule en plusieurs étapes faciles à suivre :

- Dans le navigateur du projet, commencez par double-cliquer sur « **Ajouter un appareil** ».
- Une fenêtre s'ouvre alors pour vous permettre de définir les paramètres de l'IHM.

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

- Dans cette fenêtre, choisissez d'abord la catégorie « **IHM** ».
- Ensuite, sélectionnez le type d'écran appelé « **SIMATIC Basic Panel** ».
- Parmi les différents modèles proposés, choisissez celui qui correspond à un écran de 6 pouces, plus précisément le **KTP600 Basic PN**.
- Vérifiez que l'option « **Lancer l'assistant Appareils** » est cochée : cela vous aidera à configurer l'appareil pas à pas.
- Enfin, confirmez la création de l'IHM en cliquant sur « **OK** ».

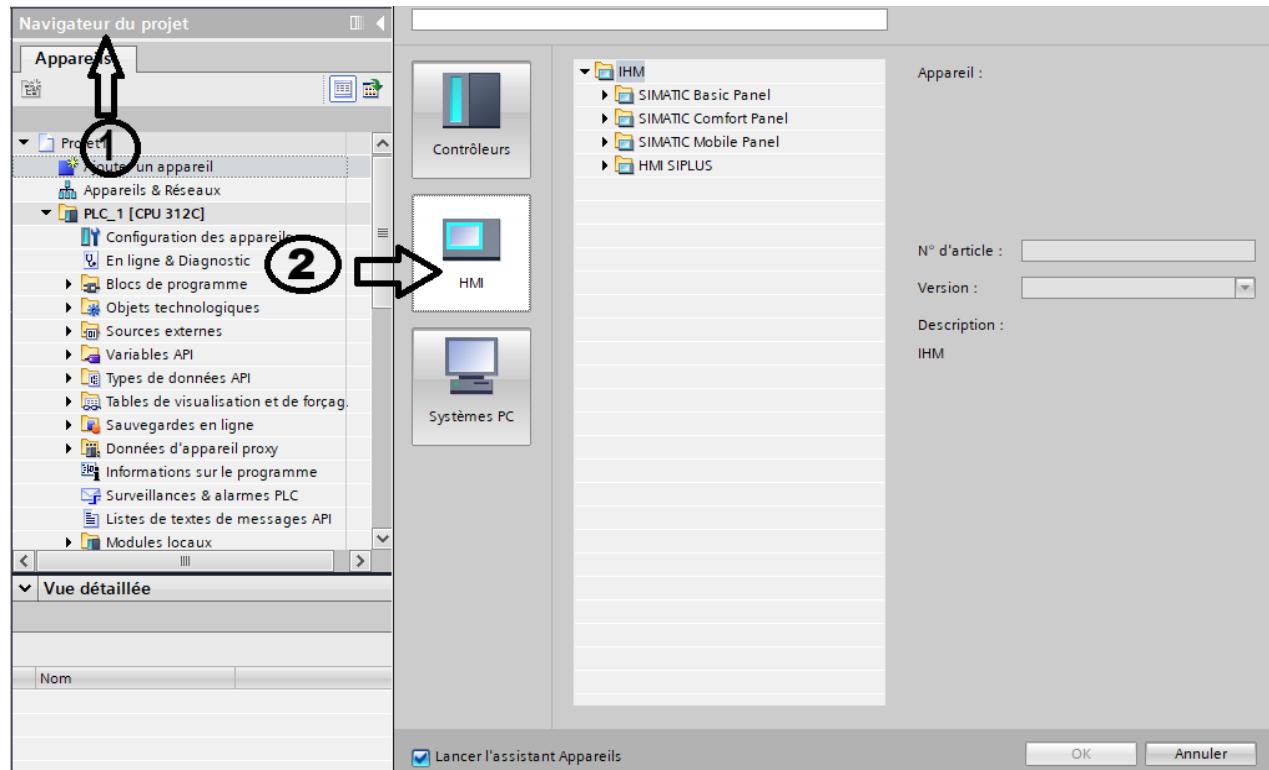


Figure III. 12 : Création d'une IHM

❖ Établir une connexion entre la CPU et l'IHM

Après avoir cliqué sur « **OK** », la fenêtre appelée « **Assistant Pupitres opérateurs** » apparaît. Cet assistant sert à configurer la communication entre la CPU et l'IHM. Pour établir cette connexion, procédez comme suit :

1. Cliquez sur le bouton « **Parcourir** » pour afficher la liste des automates disponibles dans votre projet.
2. Dans cette liste, sélectionnez la CPU « **S7-300** » qui contrôle votre système.
3. Enfin, validez votre choix en cliquant sur « **Terminer** ».

Cette étape permet de lier correctement l'interface opérateur à la CPU, assurant ainsi une communication fiable pour le contrôle et la supervision du système automatisé.



Figure III. 13 : Configuration de la connexion entre la CPU et l'IHM

III.5.1 Crédation de la table des variables IHM

Les tables de variables IHM (**Figure III. 14**) centralisent toutes les définitions des variables utilisées par l'interface homme-machine pour échanger des données avec les différents composants du projet. Chaque fois qu'une IHM est ajoutée dans TIA Portal, une table de variables est automatiquement créée pour gérer cette communication.

Dans l'arborescence du projet, un dossier intitulé « **Variables IHM** » est associé à chaque appareil IHM. Ce dossier peut contenir plusieurs types de tables, parmi lesquelles :

- La table de variables standard,
- Les tables de variables utilisateur,
- Le tableau de toutes les variables.

La table nommée « **Toutes les variables** » donne une vue complète de l'ensemble des variables liées à l'IHM, incluant également les variables systèmes propres à chaque interface. Cette table est générée automatiquement par le logiciel et ne peut pas être supprimée, renommée ou déplacée.

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

Variables IHM								
Nom	Table des variables	Type de données	Connexion	Nom API	Variable API	Adresse	Mode d'accès	
BD_Pression_mesure_PT124	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_Pression.mesure_PT...	%DB3.DB08	<accès abs...	
BD_Pression_mesure_PT124.1	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_Pression."mesure_PT..."	%DB3.DB00	<accès abs...	
BD_Pression_mesure_PT124.2	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_Pression."mesure_PT..."	%DB3.DB04	<accès abs...	
BD_Pression_mesure_PT126	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_Pression.mesure_PT1...	%DB3.DB028	<accès abs...	
BD_Pression_rupteur_PT124.1	Table de variables standard	Bool	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_Pression."rupteur_PT..."	%DB3.DBX12.0	<accès abs...	
BD_temperateur_mesure_TT124	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_temperateur.mesure_T...	%DB2.DB08	<accès abs...	
BD_temperateur_mesure_TT12...	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_temperateur."mesure_T..."	%DB2.DB00	<accès abs...	
BD_temperateur_mesure_TT12...	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	BD_temperateur."mesure_T..."	%DB2.DB04	<accès abs...	
Bloc de données_1_mesure_de...	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"Bloc de données_1".mes...	%DB1.DB06	<accès abs...	
CONT_C_DB pression	Table de variables standard	Bool	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB pression".C...	%DB4.DBX0.0	<accès abs...	
CONT_C_DB pression(1)	Table de variables standard	Bool	HM_Liaison_1	PLC_1	<indéfini>	%IO.0	<accès abs...	
CONT_C_DB pression_LMN	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB pression".L...	%DB4.DB072	<accès abs...	
CONT_C_DB pression_MAN	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB pression".M...	%DB4.DB016	<accès abs...	
CONT_C_DB pression_MAN_ON	Table de variables standard	Bool	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB pression".M...	%DB4.DBX0.1	<accès abs...	
CONT_C_DB pression_PV_IN	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB pression".P...	%DB4.DB010	<accès abs...	
CONT_C_DB pression_SP_INT	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB pression".S...	%DB4.DB06	<accès abs...	
CONT_C_DB Temperature	Table de variables standard	Bool	HM_Liaison_1	PLC_1	<indéfini>	%IO.0	<accès abs...	
CONT_C_DB Temperature_LMN	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB Temperatur..."	%DB5.DB072	<accès abs...	
CONT_C_DB Temperature_MAN	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB Temperatur..."	%DB5.DB016	<accès abs...	
CONT_C_DB Temperature_MA...	Table de variables standard	Bool	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB Temperatur..."	%DB5.DBX0.1	<accès abs...	
CONT_C_DB Temperature_PV_IN	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB Temperatur..."	%DB5.DB010	<accès abs...	
CONT_C_DB Temperature_SP_I...	Table de variables standard	Real	HM_Liaison_1	PLC_1	"CONT_C_DB Temperatur..."	%DB5.DB06	<accès abs...	

Figure III. 14 : la table des variables IHM

III.5.2. Création et organisation des vues dans l'IHM

Pour créer une nouvelle vue (écran) dans TIA Portal, il suffit de cliquer droit sur le dossier « **Écrans** » de l'IHM dans l'arborescence du projet, puis de sélectionner « **Ajouter un nouvel écran** ». Après avoir nommé la vue selon sa fonction (par exemple, « Vue Pression » ou « Vue Température »), l'éditeur graphique s'ouvre automatiquement pour permettre la conception de l'interface en y intégrant des éléments tels que textes, boutons, et autres objets interactifs.

a. Vue du système

Le système étudié comprend deux vannes régulatrices, deux capteurs de température, deux capteurs de pression, un capteur de débit et quatre chaudières. Pour interagir avec ces éléments, plusieurs boutons sont intégrés à l'interface :

- Un bouton pour sélectionner manuellement l'un des deux capteurs de température,
- Un autre bouton pour choisir entre les deux capteurs de pression,
- Un bouton permettant d'afficher la vue relative à la température,
- Un dernier bouton dédié à l'affichage de la vue pression.

Cette organisation permet une navigation fluide et un contrôle efficace des paramètres du système (voir **Figure III.15**).

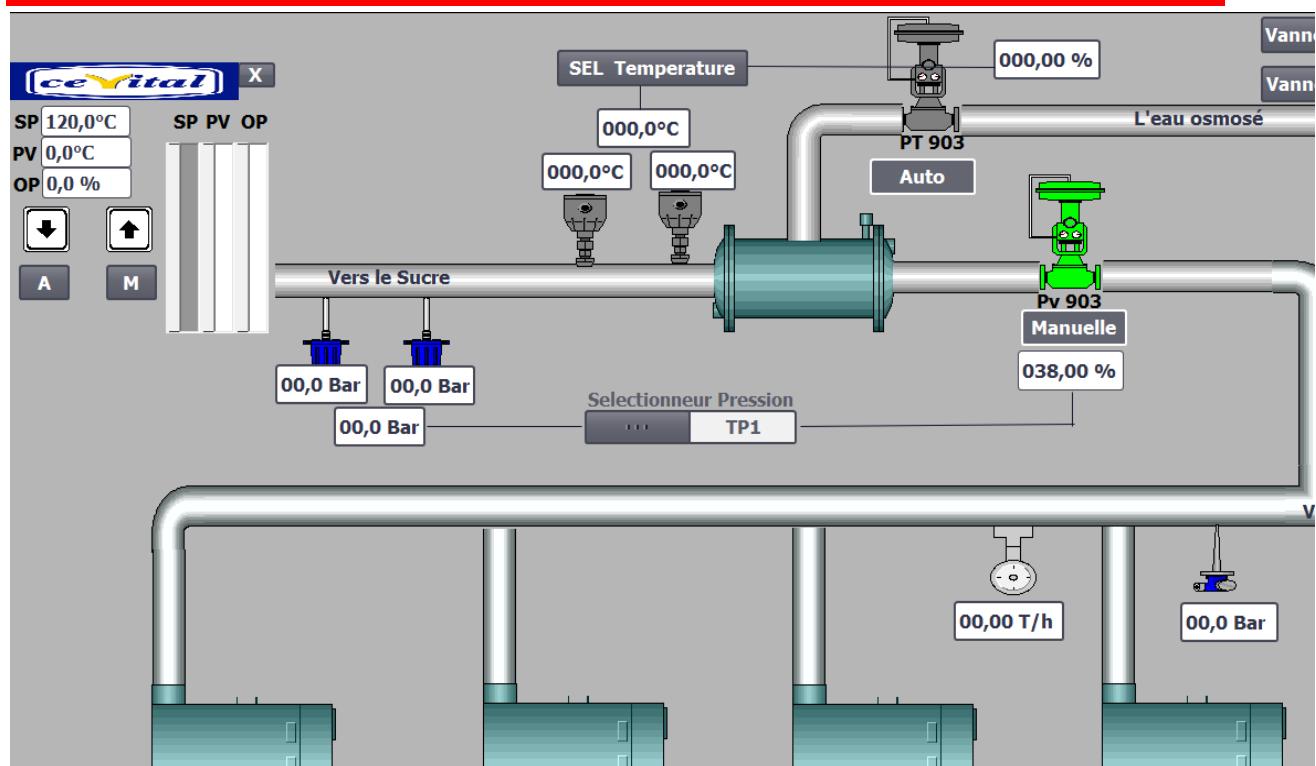


Figure III. 15 : Vue du système

b. Création d'une vue des alarmes dans l'IHM WinCC

Les étapes de la création d'une vue dédiée aux alarmes sur l'IHM sont les suivantes :

1. Définition des alarmes dans le projet

Commencez par configurer les alarmes dans la section « **Alarmes IHM** » du projet TIA Portal. C'est à cet endroit que vous définissez les événements à surveiller et les conditions de déclenchement des messages d'alarme.

2. Création ou sélection de la vue

Ouvrez l'écran sur lequel vous souhaitez afficher les alarmes, ou créez-en un nouveau en suivant la procédure habituelle (clic droit sur le dossier « **Écrans** » → « **Ajouter un nouvel écran** »).

3. Insertion de l'objet d'affichage des alarmes

Dans la **Boîte à outils**, rubrique « **Objets de contrôle** », recherchez l'objet « **Affichage d'alarmes** » (*Alarmé Control*). Faites un glisser-déposer de cet objet sur l'écran, puis redimensionnez-le en fonction de l'espace disponible.

4. Configuration de l'objet d'alarme

Ajustez les propriétés de l'objet pour définir la manière dont les alarmes seront présentées à l'utilisateur : choix des colonnes visibles (heure, message, statut...), filtres de priorité, critères de tri, couleurs, etc.

5. Compilation et transfert du projet

Une fois les réglages effectués, compilez le projet et téléchargez-le vers le pupitre HMI. À l'exécution, l'IHM affichera en temps réel les alarmes définies, permettant un suivi visuel clair et réactif du fonctionnement du système.

Alarmes en attente					
No.	Heure	Date	Etat	Texte	Acquitter le groupe
!	1	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil transmetteur PT124-1
!	2	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil transmetteur PT124-2
!	3	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil TT124.1
!	4	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil TT124.2
!	6	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil debit
!	14	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil de recoupe de position PV
!	15	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil de recoupe de position TV
!	5	00:46:48	15/06/2025	A	rupture de fil PT126

Figure III. 16 : Vue Alarmes

c. Vue contextuelle

Les vues contextuelles sont des fenêtres secondaires qui apparaissent en complément de l'écran principal, généralement à la suite d'un événement utilisateur (ex. : clic sur un bouton). Elles permettent d'afficher des informations détaillées ou des commandes spécifiques sans quitter la vue principale, améliorant ainsi l'ergonomie et la réactivité de l'interface opérateur.

Pour créer une vue contextuelle dans le projet HMI sous TIA Portal, les étapes sont les suivantes :

1. Ouverture du projet HMI

❖ Lancez le projet contenant votre interface opérateur par exemple *HMI_1 [TP1200 Comfort]*.

2. Accès à la gestion des vues contextuelles

■ Dans l'arborescence du projet (partie gauche de l'écran), développez l'arborescence suivante :

HMI_1 [TP1200 Comfort] → Vues → Gestion des vues.

3. Ajout d'une nouvelle vue contextuelle

Sélectionnez l'entrée « **Vues contextuelles** », puis cliquez sur

✚ « **Ajouter une nouvelle vue contextuelle** ». Une fois créée, cette vue pourra être personnalisée via l'éditeur graphique, selon les besoins fonctionnels (par exemple, affichage d'un graphe de température, d'un état d'alarme, ou d'une commande de vanne).

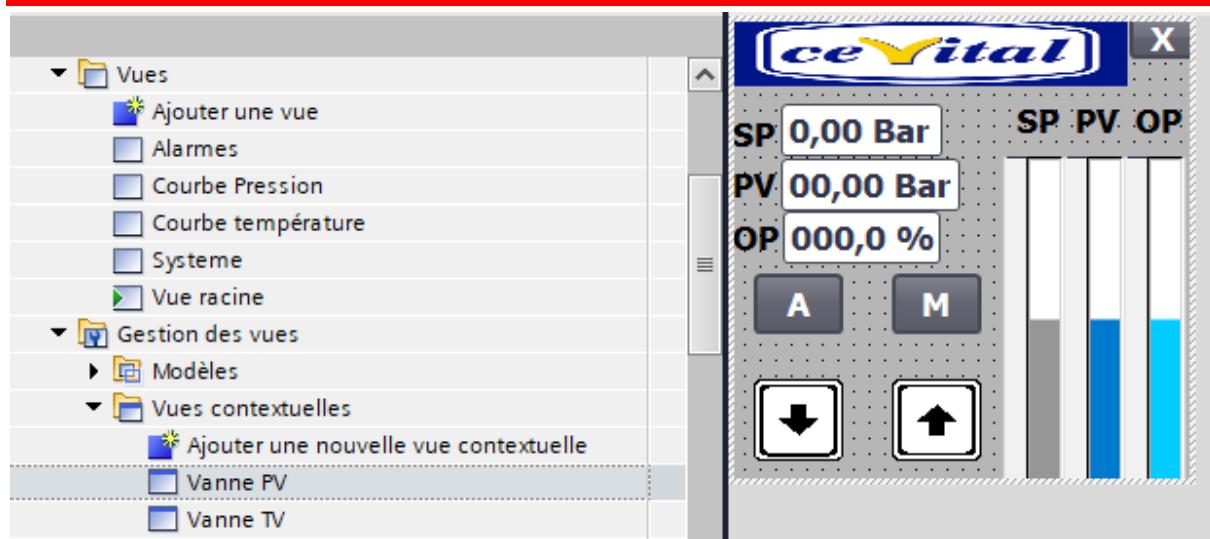


Figure III. 17 : Vue contextuelle

d. Vues des courbes

Après avoir effectué la simulation, on obtient les deux courbes suivantes :

- **Réponse de la vanne et de la pression :**
 - **Présentation du graphique de Pression**
 - Axe des abscisses (X) : le temps (s).
 - Axe des ordonnées gauche (Y₁) : la pression (bar), tracée en vert.
 - Axe des ordonnées droite (Y₂) : l'ouverture de la vanne en pourcentage (%), tracée en rouge.
 - Courbe de consigne : tracée en bleu, c'est la valeur cible que doit suivre la pression.

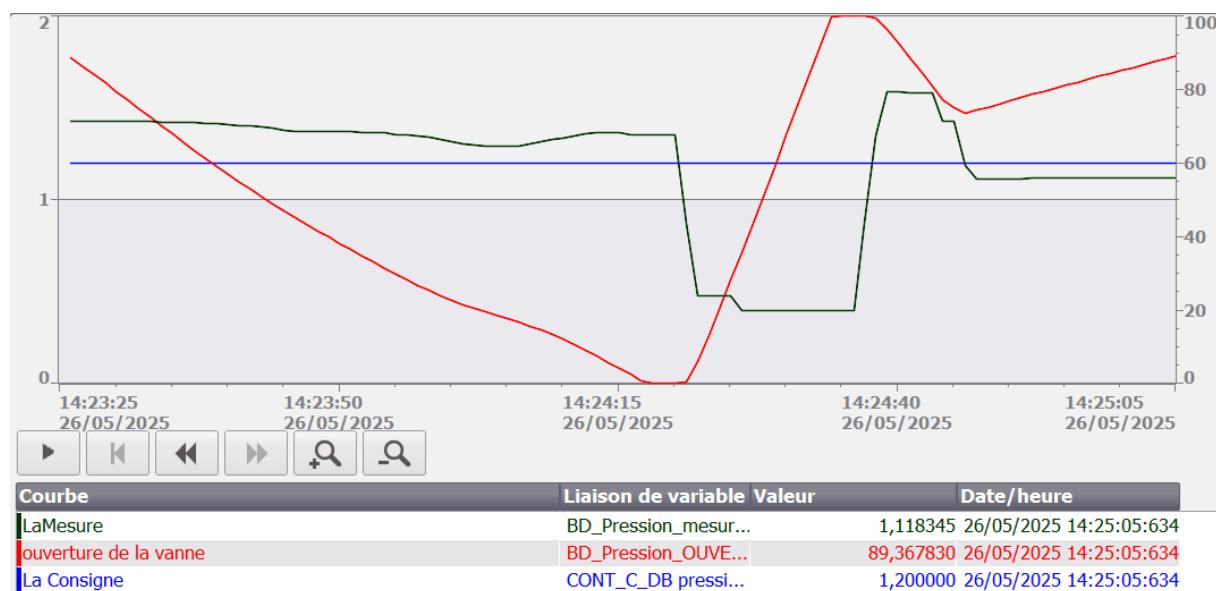


Figure III.18 : Ouverture de la vanne régulatrice de pression en pourcentage

Chapitre III : Vérification fonctionnelle par simulation et supervision du système de détente de vapeur sous TIA

Au début de la simulation, la pression (courbe verte) se trouve au-dessus de la consigne (courbe bleue). Cet écart entraîne la fermeture de la vanne afin de réduire le débit et donc la pression.

- **Réponse de la vanne et de la température :**
 - **Présentation du graphique de Température**
 - Axe des abscisses (X) : le temps (s).
 - Axe des ordonnées gauche (Y₁) : la **température** (degré Celsius), tracée en vert.
 - Axe des ordonnées droite (Y₂) : l'ouverture de la vanne en pourcentage (%), tracée en rouge.

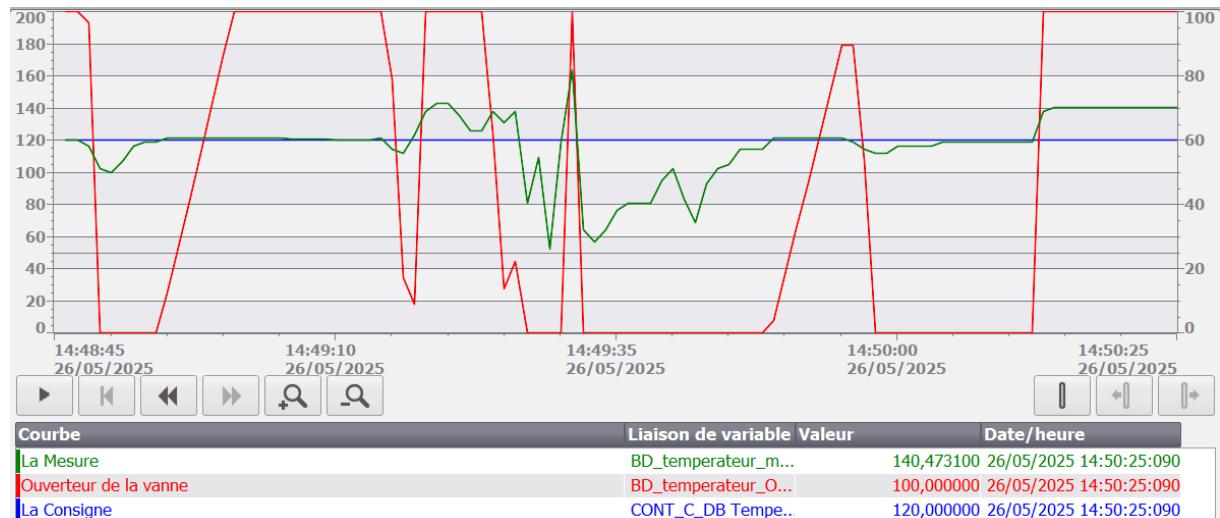


Figure III.19 : Ouverture de la vanne régulatrice de température en pourcentage

Au démarrage, la température (courbe verte) se situe sous la consigne (courbe bleue).

Pour corriger cet écart, le régulateur commande la vanne : fermeture de la vanne.

À la suite de la fermeture, la température (courbe verte) commence à monter vers la consigne.

III.6. Conclusion

À l'issue de la phase d'implémentation sur TIA Portal, l'automatisation de la séquence de détente de vapeur a pu être réalisée avec succès, intégrant une régulation PID efficace pour le pilotage de la vanne. L'ensemble des vues développées dans l'IHM, telles que la vue système, les vues contextuelles ou encore l'affichage des alarmes, ont permis d'assurer une supervision intuitive et complète du procédé.

L'utilisation de courbes dynamiques pour le suivi des grandeurs physiques (pression, température, débit) a facilité l'analyse du comportement du système en temps réel et la validation des performances du régulateur. Les résultats obtenus lors des tests montrent une réponse satisfaisante du système, conforme aux exigences de stabilité, de rapidité et de précision attendues.

Ainsi, l'interface homme-machine développée via WinCC s'est imposée comme un outil de pilotage ergonomique, réactif et parfaitement adapté aux besoins industriels.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons réussi à concevoir et mettre en œuvre un système automatisé de régulation de la pression de vapeur au sein de l'usine CEVITAL, en utilisant l'environnement TIA Portal et un automate Siemens CPU 313C. Ce projet a permis d'apporter une solution concrète à une problématique industrielle réelle, en garantissant un contrôle précis, fiable et stable de la vanne de détente du circuit vapeur.

L'étude a débuté par une présentation complète de l'organisation de l'usine et de ses différentes unités, afin de bien situer le contexte et les besoins en automatisation. Elle s'est poursuivie par une analyse détaillée des composants clés du système de détente chaudières, capteurs, collecteur et vanne régulatrice constituant ainsi une base technique solide. Cette approche a été enrichie par une modélisation théorique approfondie de la régulation PID, indispensable pour assurer la stabilité et la performance du processus.

L'implémentation sur TIA Portal a permis de développer un programme structuré et fonctionnel, intégrant tous les blocs nécessaires au bon fonctionnement du régulateur. Parallèlement, l'interface de supervision conçue sous WinCC a offert un outil efficace pour le suivi en temps réel des grandeurs physiques, la gestion des alarmes et le pilotage intuitif de l'installation. Ces éléments ont renforcé l'ergonomie et la fiabilité du système.

Les tests réalisés ont confirmé la pertinence et l'efficacité de la solution mise en place, avec une régulation stable, réactive et conforme aux exigences du procédé industriel.

Ce projet illustre pleinement le potentiel des solutions d'automatisation dans l'optimisation des procédés thermiques industriels. Il ouvre également des perspectives intéressantes pour des développements futurs, notamment l'intégration de techniques d'optimisation adaptative et le recours à des capteurs communicants pour une supervision plus précise.

Travaux à venir

Plusieurs pistes d'amélioration et d'évolution peuvent être envisagées pour prolonger ce travail et optimiser davantage le système automatisé de régulation :

- **Optimisation adaptative du régulateur** : Mettre en place des algorithmes de réglage automatique des paramètres PID afin d'améliorer la performance en conditions variables et réduire les interventions manuelles.
- **Intégration de capteurs intelligents et IoT** : Connecter des capteurs communicants pour un suivi en temps réel plus précis et une collecte de données facilitée, permettant une meilleure supervision et un diagnostic avancé.
- **Extension à d'autres paramètres du procédé** : Étendre la régulation automatisée à d'autres variables importantes du circuit vapeur, comme la température ou le débit, pour une gestion globale plus fine.
- **Simulation et validation numérique** : Utiliser des modèles numériques détaillés pour simuler différents scénarios de fonctionnement, permettant d'évaluer les performances du système avant sa mise en œuvre physique.

Ces travaux futurs contribueraient à renforcer la robustesse, la flexibilité et l'efficacité du système de régulation, répondant ainsi aux exigences croissantes de l'industrie moderne.

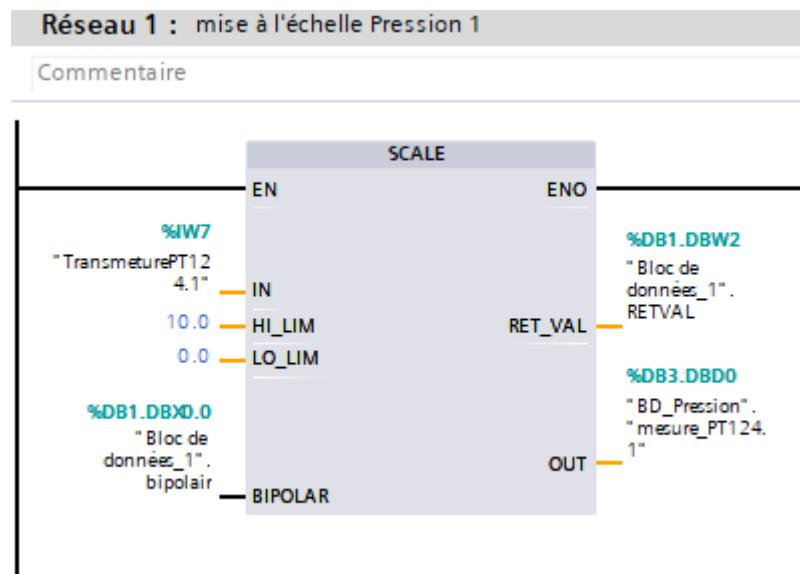
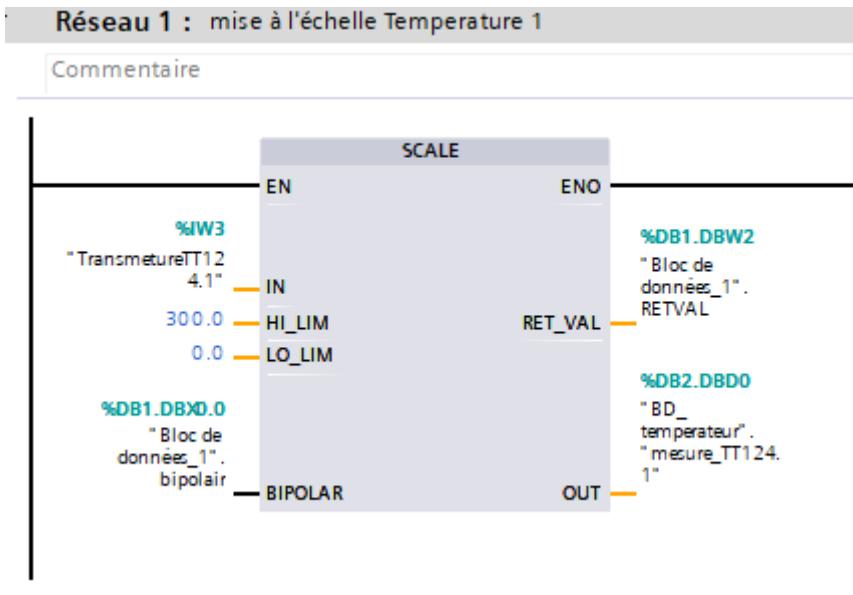
Bibliographie

- [1] Manuelle de CEVITAL. www.cevital.com consulter le 25 avril 2025
- [2] M. Nacer-Eddine, M. Chaouki « Etude De L'intégration De La Cogénération Dans Le Secteur Du Bâtiment En Algérie » Universite Kasdi Merbah Ouargla,2020
- [3] R. Michel , « La vapeur - Mode d'emploi », Livre, Collectif Editions Parisiennes (EDIPA),2004
- [4] D. Chafai, Calcul énergétique de l'installation combinée de Borj-Chegwa pour production d'électricité, Mémoire, Université Mohamed Khider de Biskra,2020
- [5] F. BOUZID, « simulation thermique d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire et calandre », Mémoire, Universite Badji Mokhtar – Annaba,2021
- [6] B. LAOUAMEUR, « Etude du système contrôle commande d'une centrale électrique à cycle combiné », Mémoire, Universite Kasdi Merbah Ouargla,2021
- [7] T. Lalouche, Z. DJELLOUDI « Etude et réalisation d'une micro-turbine à vapeur » Mémoire, Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira) ,2016
- [8] L.Boucerredj , « Support de cours pédagogique Intitulé : REGULATION INDUSTRIELLE»,Mémoire, Université 8 Mai 1945 – Guelma,2022
- [9] Y. SEDDAR, K. GHEZAL, Contribution à l'Implémentation d'un Régulateur Flou sous un API S7-300, Mémoire, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2017.
- [10] B. Djellali et B. Djebabla, « Analyse Des Causes De Défaillance des Pompes Centrifuges », Mémoire, UniversitéBadjiMokhtar-Annaba,2021
- [11] S. Boyer International Society of Automation,SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition Book, Fourth Edition, février 2016
- [12] K. Sekhri et N.Djoudi, « Automatisation D'un système de détente vapeur, » mémoire de master en automatique et système, Univ.Beaia, 2021
- [13] M. Tebane et F.Tekfa, « Automatisation d'une chaudière LOOS par un automate programmable S7-300 de complexe cevital, » mémoire de master en automatisme industriel, Univ.Beaia, 2012.
- [14] A. H. Harfouche et L. Hassaini, « Automatisation et supervision de la bâche des chaudières au niveau de cevital, » Mémoire de master en automatique, Univ. Bejaia,2021.
- [15] samsongroup, Fiche technique - document PDF fourni par Cevital disponible sur <https://www.samsongroup.com/fr/produits/> (consulté le 2 mai 2025)
- [16] K. J. Åström and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd ed. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1995.
- [17] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, 7th ed. Pearson, 2015.
- [18] K. Ogata, Systèmes de contrôle modernes, 5th ed. Pearson, 2010.
- [19] R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern Control Systems, 12th ed. Pearson Education, 2011.
- [20] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, 7th ed. Pearson, 2015.
- [21] Documentation TIA PORTAL, version 15.1,2018

Annexes

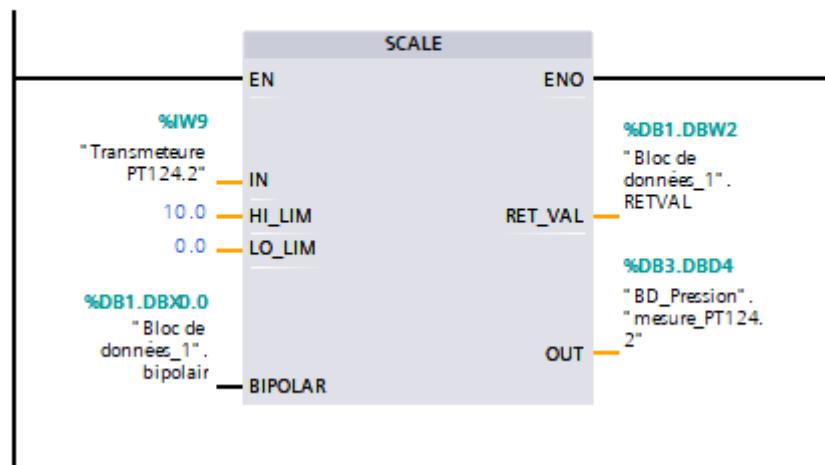
ANNEXE N°1

Bloc des entrées analogiques



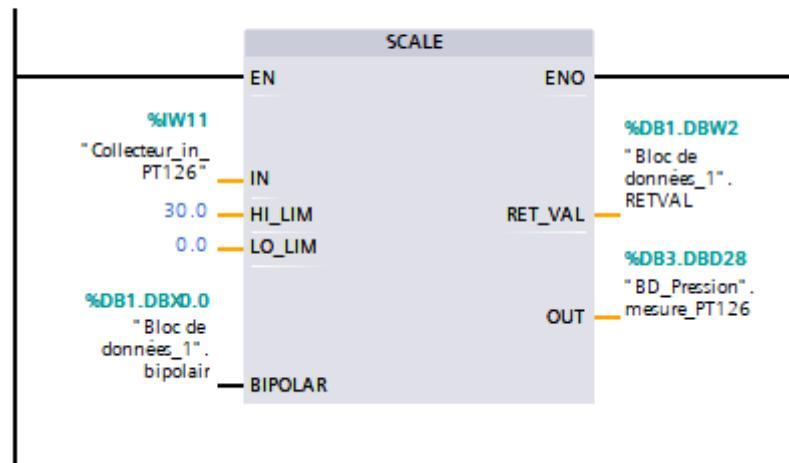
Réseau 2 : mise à l'échelle Pression 2

Commentaire



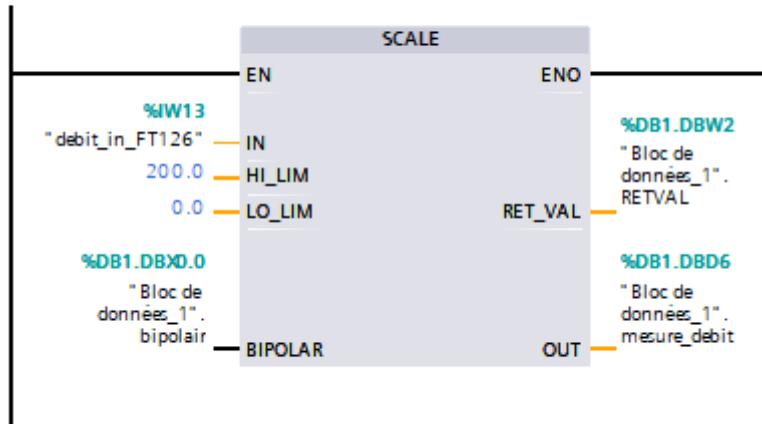
Réseau 1 : mise à l'échelle Collecteur

Commentaire



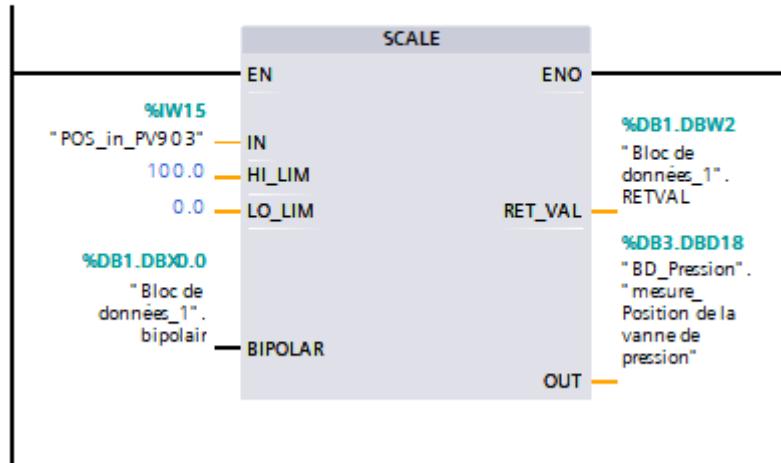
Réseau 1 : mise à l'échelle Débit

Commentaire



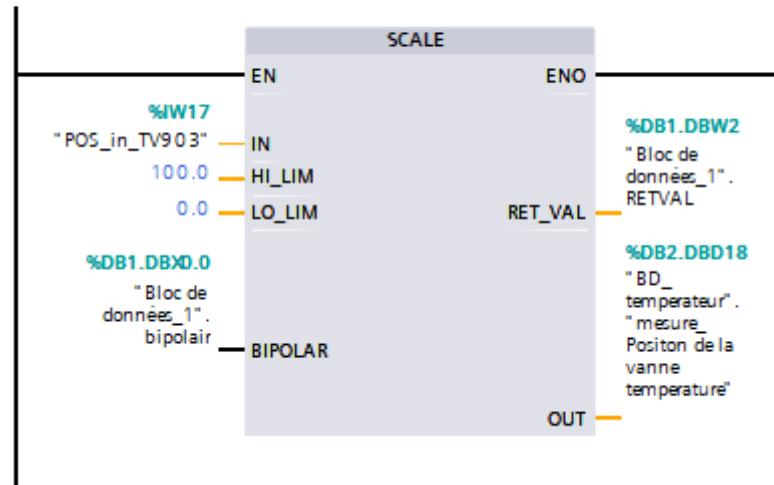
Réseau 1 : Mise à l'échelle de Pos_Vanne_Pression

Commentaire



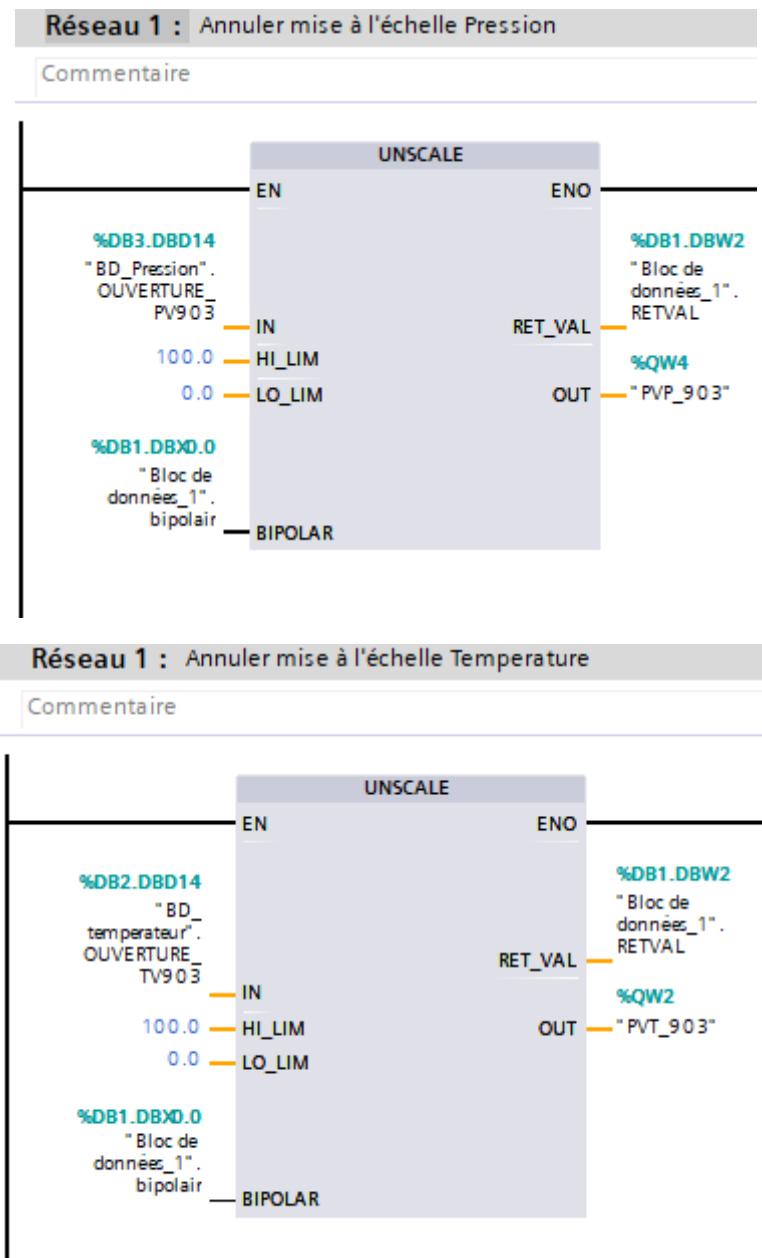
Réseau 1 : mise à l'échelle_pos_vanne_temperature

Commentaire



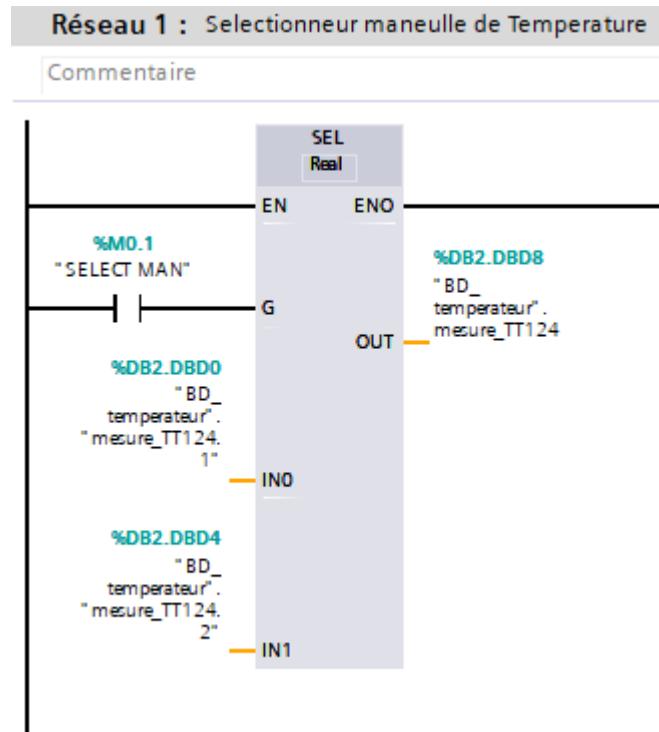
ANNEXE N°2

Bloc des sorties analogiques



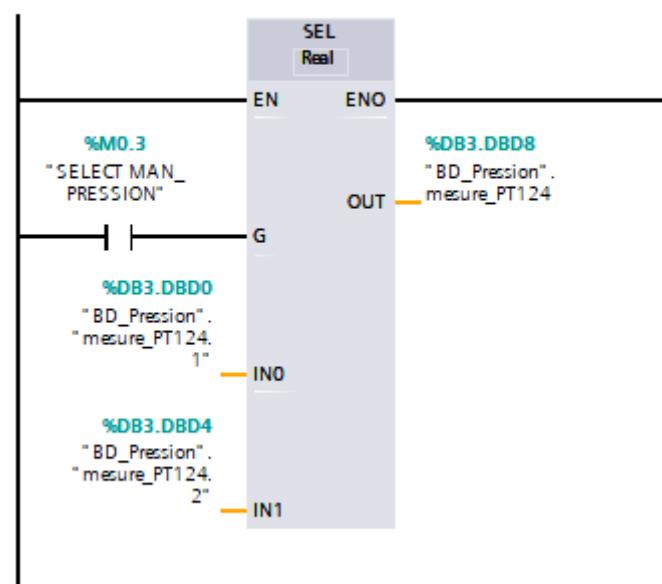
ANNEXE N°3

A. Bloc de Sélectionneur Automatique



Réseau 2 : Selectionneur manuelle de Pression

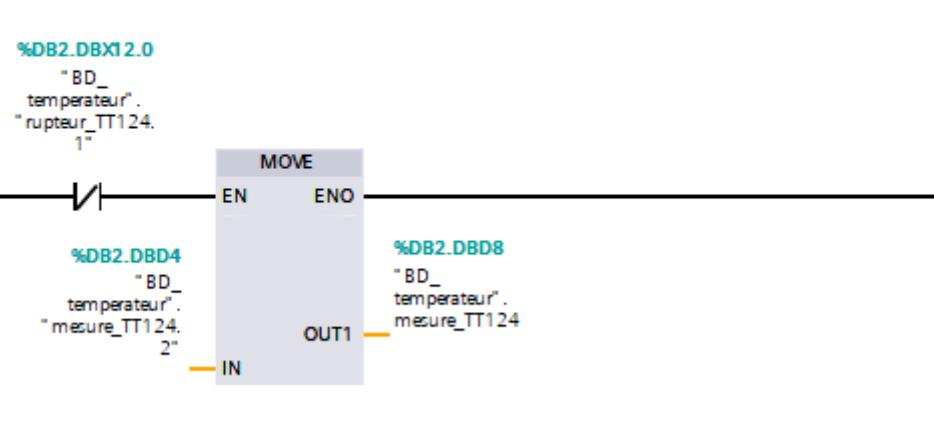
Commentaire



B. Bloc de Sélectionneur Automatique

Réseau 1 : Selectionneur automatique de Température 1 en Cas de rupture de fil

Commentaire



Réseau 2 : Selectionneur automatique de Température 2 en Cas de rupture de fil

Commentaire

%DB2.DBX12.1
"BD_
température".
"rupteur_TT124.
2"

MOVE

EN

ENO

%DB2.DBDO
"BD_
température".
"mesure_TT124.
1"

IN

%DB2.DB8

"BD_
température".
mesure_TT124

OUT1

Réseau 3 : Selectionneur automatique de Pression 1 en Cas de rupture de fil

Commentaire

%DB3.DBX12.0
"BD_Pression".
"rupteur_PT124.
1"

MOVE

EN

ENO

%DB3.DBDO
"BD_Pression".
"mesure_PT124.
2"

IN

%DB3.DB24

"BD_Pression".

PT124

OUT1

Réseau 4 : Selectionneur automatique de Pression 2 en Cas de rupture de fil

Commentaire

%DB3.DBX12.1
"BD_Pression".
"rupteur_PT124.
2"

MOVE

EN

ENO

%DB3.DBDO
"BD_Pression".
"mesure_PT124.
1"

IN

%DB3.DB24

"BD_Pression".

PT124

OUT1

ANNEXE N°4

Bloc rupture de fils

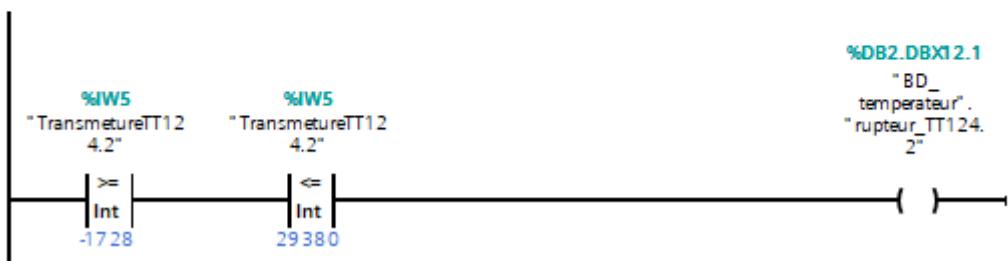
Réseau 1 : cas de rupture_fil de transmetteur de température 1

Commentaire



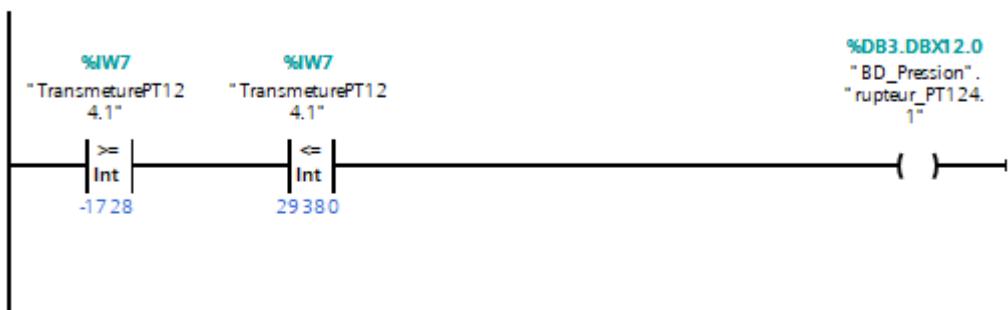
Réseau 2 : cas de rupture_fil de transmetteur de température 2

Commentaire



Réseau 3 :

cas de rupture_fil de transmetteur de Pression 1



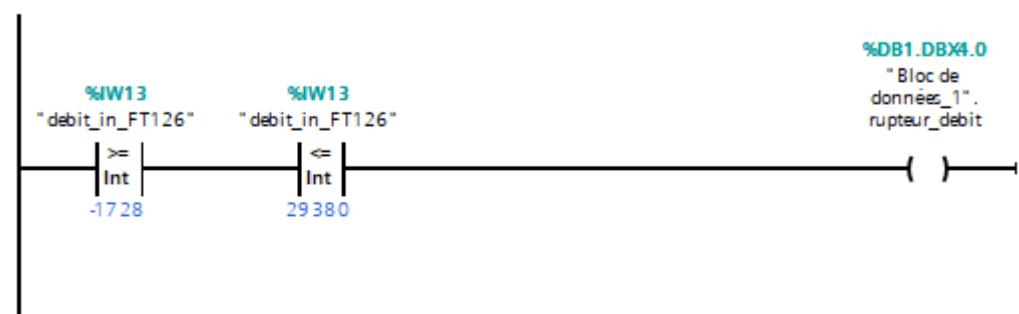
Réseau 4 : cas de rupture_fil de transmetteur de Pression 2

Commentaire



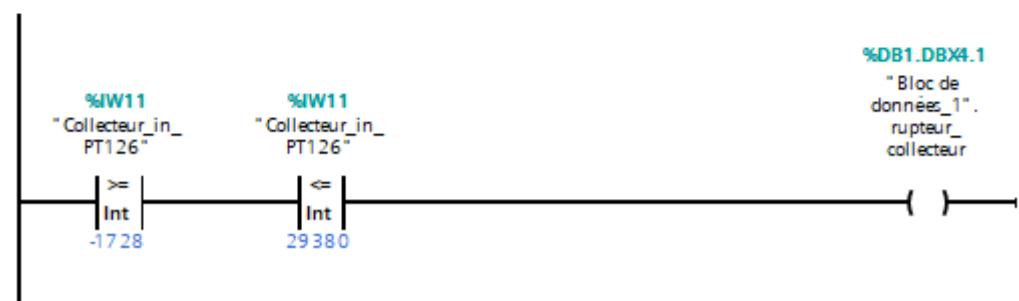
Réseau 5 : cas de rupture_fil de transmetteur de Débit

Commentaire



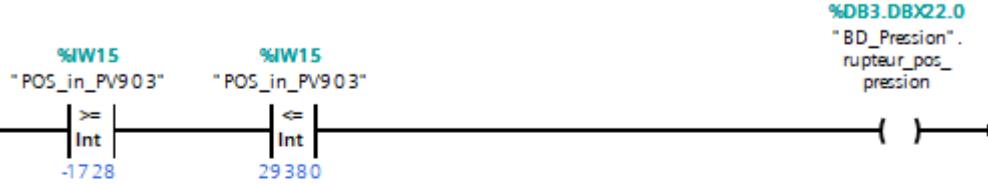
Réseau 6 : cas de rupture_fil de transmetteur de Collecteur

Commentaire



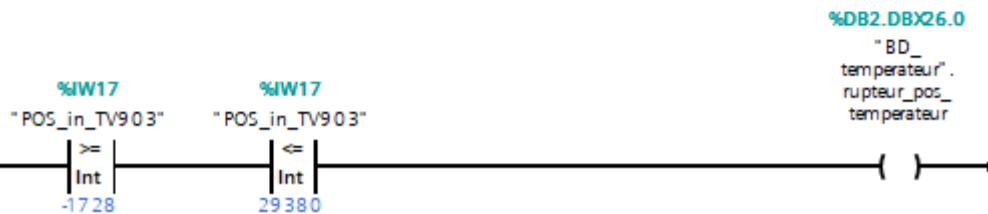
Réseau 7 : cas de rupture_fil de Positionneur_Pression

Commentaire



Réseau 8 : cas de rupture_fil de Positionneur_Temperature

Commentaire



ANNEXE N°5

I. Bloc de Données API

Variables API								
	Nom	Table des variables	Type de données	Adresse	Réman...	Acces...	Visibl...	
»	TransmetureTT124.1	Table de variabl...	Int	%IW3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	TransmetureTT124.2	Table de variables s..	Int	%IW5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	TransmeturePT124.1	Table de variables s..	Int	%IW7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	Transmeture PT124.2	Table de variables s..	Int	%IW9		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	Collecteur_in_PT126	Table de variables s..	Int	%IW11		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	debit_in_FT126	Table de variables s..	Int	%IW13		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	POS_in_PV903	Table de variables s..	Int	%IW15		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	POS_in_TV903	Table de variables s..	Int	%IW17		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	PVT_903	Table de variables s..	Int	%QW2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	PVP_903	Table de variables s..	Int	%QW4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	Tag_1	Table de variables s..	Bool	%M0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	SELECTMAN	Table de variables s..	Bool	%M0.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	SELECTIONNEUR	Table de variables s..	Bool	%M0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	SELECTMAN_PRESSION	Table de variables s..	Bool	%M0.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
»	Tag_2	Table de variables s..	Bool	%M0.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	<Ajouter>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

II. Bloc de Données Pression

BD_Pression								
	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Valeur de ..	
1	» Static				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	» mesure_PT124.1	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	» mesure_PT124.2	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	» mesure_PT124	Real	8.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	» rupteur_PT124.1	Bool	12.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	» rupteur_PT124.2	Bool	12.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	» OUVERTURE_PV903	Real	14.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	» mesure_Position de la..	Real	18.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	» rupteur_pos_pression	Bool	22.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	» PT124	Real	24.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	» mesure_PT126	Real	28.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

III. Bloc de Données Température

BD_temperateur								
	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Valeur de ..	Commentaire
1	Static				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	mesure_TT124.1	Real	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	mesure_TT124.2	Real	4.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	mesure_TT124	Real	8.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	rupteur_TT124.1	Bool	12.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	rupteur_TT124.2	Bool	12.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	OUVERTURE_TV903	Real	14.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	mesure_Positon de la ...	Real	18.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	TT124	Real	22.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	rupteur_pos_tempera...	Bool	26.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

IV. Bloc de Données

Bloc de données_1								
	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Valeur de ..	Commentaire
1	Static				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	bipolaire	Bool	0.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	RETVAL	Word	2.0	16#0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	rupteur_debit	Bool	4.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	rupteur_collecteur	Bool	4.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	mesure_debit	Real	6.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	