

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master
Académique
Spécialité : Automatique et systèmes

Par :

HERIZI djamal Eddine

CHATRA Mohamed Nouh

Intitulé :

Conception et Réalisation d'un Système de Pompage
Intelligent et Autonome pour l'Irrigation

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. OUAGUENI <u>Fayssal</u>	Université de M'sila	Président
Dr. Herizi Abdelghafour	Université de M'sila	Encadreur
Dr. Zouggar Eloualid	Université de M'sila	Co-Encadreur
Dr. AIB Abdelghani	Université de M'sila	Examineur
/	Université de M'sila	Incubateur

Année universitaire : 2025 / 2026

Remerciements



Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force, la patience et la volonté de mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, le **Dr HERIZI Abdelghafour**, pour son accompagnement, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce projet. Nous remercions également le **Dr ZOUGGAR Eloualid** pour ses précieux conseils et son suivi pédagogique.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre mémoire et pour le temps qu'ils y ont consacré.

Nos remerciements s'adressent chaleureusement à tous les enseignants de notre parcours, qui ont su nous transmettre leur savoir et nous guider tout au long de notre formation.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles respectives, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, nous ont soutenus dans l'accomplissement de ce projet.

Merci à toutes et à tous.

Dédicaces



Je dédie ce mémoire :

À ma mère et à mon père,

À toute ma famille,

Pour leur soutien inconditionnel et pour toutes les valeurs qu'ils ont su
m'inculquer.

À mes amis et collègues,

Qui ont été un soutien précieux tout au long de ce parcours.

À mon enseignant encadreur,

Qui a été un véritable appui durant ce travail.

À tous les enseignants, au personnel administratif et à la grande
famille universitaire.

CHARTA Mohamed Nouh

Dédicaces



Je dédie ce travail :

À mes chers parents, ma mère et mon père,

À toute ma famille,

Pour leur soutien indéfectible et les nobles valeurs qu'ils m'ont
transmises.

À mes précieux amis et collègues,

Qui ont toujours été présents à mes côtés.

À mon encadreur,

Pour son orientation, sa bienveillance et son appui constant.

À l'ensemble du corps enseignant, aux membres du personnel et à
toute la communauté universitaire.

HERIZI djamal Eddine

SOMMAIRE

Introduction générale.....	0
Chapitre I : Aperçu Général des Systèmes d'Irrigation en Agriculture	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Fondamentaux de l'irrigation :	3
I.2.1. Définition de l'irrigation :	4
I.2.2. Objectifs de l'irrigation :	4
I.2.3. Les sources d'eau en agriculture :	4
I.3. Classification et Évolution des Méthodes d'Irrigation.....	7
I.3.1. Irrigation de surface (Gravitaire) :	8
I.3.2. Irrigation par aspersion :	9
I.3.3. Micro-irrigation (Goutte-à-goutte) :	10
I.3.4. Irrigation Souterraine :	11
I.3.5. Comparaison des performances :	12
I.4. Les besoins en eau des cultures :	12
I.4.1. Paramètres influençant l'irrigation :	12
I.4.2. Le pilotage de l'irrigation :	13
I.4.3. Paramètres d'irrigation par culture :	13
I.5. L'Irrigation intelligente et l'automatisation :	14
I.5.1. Limites des systèmes manuels :	14
I.5.2. Concept de l'irrigation intelligente :	14
I.5.2.1. Architecture générale :	15
I.5.2.2. Logique de fonctionnement :	15
I.5.2.3. Gestion sectorisée (par zones) :	15
I.5.2.4. Capteurs intégrés au système :	15
I.5.2.5. Système de pompage et réservoir :	17
I.5.2.6. Système de distribution par zones :	18
I.5.2.7. Méthode de fonctionnement globale :	18
I.5.2.8. Détection de fuite (diagnostic par pression) :	19
I.5.2.9. Comparaison avant / après automatisation :	19
I.5.3. Introduction à l'Automate Programmable Industriel (API) :	20
I.5.3.1. Rôle dans le système d'irrigation :	20
I.5.3.2. Cycle de fonctionnement de l'API :	20

I.5.3.3. Exemple de logique de contrôle :	20
I.5.3.4. Avantages de l'API :	21
I.6 Conclusion :	22
Chapitre II : Architecture du Système et Composants Matériels	
II.1. Introduction :	24
II.2. Choix et Description de l'Unité de Contrôle Centrale :	25
II.2.1. Présentation de l'Automate Programmable Industriel (API) :	25
II.2.2. Pourquoi choisir un API plutôt qu'une carte type Arduino ? : Comparatif technique entre un API Industriel et une Carte Arduino :	26
II.2.3. Fonctionnement : le cycle de balayage et le déterminisme :	27
II.2.4. Choix du modèle d'API et des modules d'extension :	27
a) Bilan des entrées/sorties du système :	27
b) Sélection de l'automate :	28
II.2.5. La gamme SIMATIC S7-1200 a été retenue pour :	29
a) Module extension analogique:	29
b) Tableau récapitulatif du matériel retenu :	30
II.3. Chaîne de Mesure : Les Capteurs :	30
II.3.1. Capteur de niveau à ultrasons (bassin de stockage) :	30
II.3.2. Capteur de pluie :	31
II.3.3. Capteur de débit.....	32
II.3.4. Capteur de pression :	32
II.3.5. Capteurs de vibration (Pompe 1 et Pompe 2) :	33
II.3.6. Capteurs d'humidité du sol (Zones A, B, C, D) :	34
II.4. Chaîne de Commande : Les Actionneurs :	35
II.4.1. Pompe immergée (forage) :	35
II.4.2. Pompes de surface (Pompe 1 et Pompe 2) :	36
II.4.3. Électrovannes de zone et d'isolement (EVA, EVB, EVC, EVD, EVP1, EVP2) :	37
II.4.4. Contacteurs et protection moteur :	37
a) Pompe immergée 7,5 kW : Démarrage Étoile-Triangle :	37
II.4.5. Tableau récapitulatif des actionneurs :	38
II.5. Système d'Alimentation Électrique:	39
II.5.1. Alimentation générale:	39
II.5.2. Alimentation de l'API et des capteurs :	40
II.5.3. Protection électrique:	40
II.6. Interface Homme-Machine (IHM) :	41
II.6.1. Écran tactile KTP700 Basic:	41

II.6.2. Fonctionnalités de l'IHM:	42
II.6.3. Télésurveillance GSM:	43
a) Alarmes programmables par SMS :	44
II.7. Système de Communication et Câblage :	44
II.7.1. Architecture du réseau de communication :	45
II.7.2. Protocoles de communication: Le tableau suivant récapitule l'architecture de communication et les différents types de liaisons électriques adoptés pour assurer l'échange de données au sein de notre système [25].	46
II.7.3. Plan de câblage et sections de câble : Ce tableau résume le dimensionnement et les caractéristiques des câbles électriques :	46
II.8. Schéma d'Architecture Globale du Système: Structure du système ...	47
II.9. Conclusion:	48
 Chapitre III : Validation et Programmation de l'Automate	
III.1. Introduction :	50
III.2. Schéma Électrique de Puissance :	51
III.2.1. Définition et rôle du schéma de puissance :	51
III.2.2. Constitution d'un démarreur étoile-triangle :	52
III.2.3. Application : démarrage pompe immergée 7,5 kW	52
III.2.3.1. Le schéma unifilaire complet comporte les éléments suivants :	52
III.2.3.2. La logique de commande intègre un verrouillage électrique et logiciel :	53
III.2.4. Application : démarrages directs DOL pompes 3 kW :	54
III.2.4.1 Le schéma simplifié de chaque démarreur comprend :	54
III.3. Schéma Électrique de Commande :	54
III.3.1. Définition et rôle du schéma de commande :	54
III.3.2. Principe des entrées/sorties sur API :	55
III.3.3. Application : schéma de développement complet :	56
III.4. GRAFCET : Outil de Description des Séquences :	57
III.4.1. Définition et structure du Grafcet :	57
III.4.2. Principe de fonctionnement :	57
III.4.3. Application : séquence d'irrigation automatique :	58
III.5. Langage Ladder (LD) : Logique à Contacts :	59
III.5.1. Définition et origine du Ladder :	59
III.5.1.1. La structure élémentaire comprend :	59
III.5.2. Principe de fonctionnement :	60
III.5.3. Application : commande marche/arrêt pompes :	64
III.5.3.1. Le réseau Ladder de commande d'une pompe surface (exemple P1) s'organise comme suit :	64

III.5.4. Application : sécurités et inter verrouillages :	64
III.5.4.1. Les sécurités logicielles sont programmées en Ladder sous forme de conditions de validation :	64
III.6. Télésurveillance GSM :	64
III.6.1. Définition et protocole SMS :	64
III.6.2. Principe d'envoi d'alarme par API.....	65
III.6.3. Application : programmation des alarmes SMS	65
III.7. Supervision et Interface Homme-Machine	66
III.7.1. Définition de la supervision industrielle :	66
III.7.2. Principe de configuration dans TIA Portal :	66
III.7.3. Application : écrans de l'application irrigation :	67
III.7.3.1. Écran principal — Vue synoptique :	67
III.7.3.2. Écran paramétrage — Réglages système :	67
III.7.3.3. Écran alarmes — Historique et acquittement :	67
III.7.3.4. Écran tendances — Courbes temporelles	67
III.8. Tests et Validation du Programme	67
III.8.1. Méthodologie de test :	67
III.8.2. Application : scénarios de test validés	68
III.8.2.1. Test 1 : Remplissage bassin + séquence 4 zones :	68
III.8.2.2. Test 2 : Défaut pompe + bascule automatique avec maintien de la zone :	68
III.8.2.3. Test 3 : Suppression + arrêt d'urgence :	68
III.8.2.4. Test 4 : Pluie détectée + arrêt d'urgence conditionnel :	68
III.9. Conclusion	69
Conclusion Générale	70
Références	73

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Les eaux de surface.	5
Figure I.2 : Les eaux souterraines.	5
Figure I.3 : Les eaux de pluie 1.	6
Figure I.4 : Les eaux de pluie 2.	6
Figure I.5 : Les eaux usées traitées.	7
Figure I.6 : Méthodes d'Irrigation.....	8
Figure I.8 : Irrigation par aspersion.	10
Figure I.8 : Micro-irrigation (Goutte-à-goutte).	11
Figure I.9 : Irrigation Souterraine.	11
Figure I.10. L'Irrigation Intelligente et l'Automatisation.....	14
Figure I.11 : les Capteurs.	16
Figure I.12 : KNX - détecteur de pluie.....	16
Figure I.13 : Capteur de niveau (ultrasonique).....	16
Figure I.14 : Capteur de débit.....	17
Figure I.15 : Capteur de pression.	17
Figure I.16 : Réservoir.....	18
Figure II.1 : Diagramme de Système d'irrigation autonome.....	24
Figure II.2 : – Architecture interne d'un API	25
Figure II.3 : Cycle de balayage de l'API S7 1200	26
Figure II.4 : Le CPU Siemens S7-1200 1214C.....	29
Figure II.5 : Siemens SM 1231, AI 8x13 bit 6ES72314HF320XB0 API - Module d'entrée / sortie analogique 24 V	30
Figure II.6 : Capteur ultrason mesure niv. 0-3m.	31
Figure II.7 : KNX - détecteur de pluie	31
Figure II.8 : Capteur de débit.	32
Figure II.9 : Capteur de pression.....	33
Figure II.10 : Capteurs de vibration.	33
Figure II.11 : Capteurs d'humidité	34
Figure II.12 : Pompe Immergée.....	35
Figure II.13 : pompe irrigation agricole	36
Figure II.14 : Électrovanne	37

Figure II.15 schéma du circuit de commande	38
Figure II.16 schéma du circuit de puissance.....	38
Figure II.17 : KTP700 Basic interface home machine.....	41
Figure II.18 : Architecture du réseau de communication	45
Figure II.19 : Câble blindé LIYCY	47
Figure II.20 :Schéma d'Architecture Globale du Système.....	47
Figure III.1 : Schéma Électrique de Puissance.....	50
Figure III.2 :Le schéma unifilaire complet.....	53
Figure III.3 : Schéma Électrique de Commande	55
Figure III.4 :Table des mnémoniques	56
Figure III. 6 :grafcet de niveau	59
Figure III.7 ladder de systeme	60
Figure III.8 ladder de système	61
Figure III.9 : ladder de système réservoir	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Tableau de Comparaison des performances.	12
Tableau I.2 : Paramètres d'irrigation et seuils de pilotage par culture.....	13
Tableau I.3 : des états de pression.....	19
Tableau I.4 : Comparaison avant / après automatisation.....	19
Tableau II.1 : Comparaison API vs Arduino	26
Tableau II.2 : Bilan des entrées/sorties du système	28
Tableau II.3 : Module extension analogique	29
Tableau II.4 : récapitulatif du matériel retenu.	30
Tableau II.5 : Capteur de niveau à ultrasons (bassin de stockage).....	30
Tableau II.6 : Capteur de pluie	31
Tableau II.7 : Capteur de débit..	32
Tableau II.8 : Capteur de pression.....	32
Tableau II.9 : Capteurs de vibration (Pompe 1 et Pompe 2)	33
Tableau II.10 : Capteurs d'humidité du sol (Zones A, B, C, D).	34
Tableau II.11 : Pompe immergée (forage)	35
Tableau II.12 : Pompes de surface (Pompe 1 et Pompe 2)	36
Tableau II.13 : Électrovannes de zone et d'isolement (EVA, EVB, EVC, EVD, EVP1, EVP2).	37
Tableau II.14 : Pompe immergée.....	38
Tableau II.15 : Tableau récapitulatif des actionneurs.	39
Tableau II.16 : Alimentation générale.	39
Tableau II.17 : Alimentation de l'API et des capteurs.	40
Tableau II.18 : Protection électrique.....	40
Tableau II.19: Écran tactile KTP700 Basic	41
Tableau II.20 : Fonctionnalités de l'IHM.	43
Tableau II.21 : Télésurveillance GSM	44
Tableau II.22 : Alarmes programmables par SMS	44
Tableau II.23 : Architecture Réseau et Protocoles de Communication.....	46
Tableau II.24 Plan de câblage et sections de câble	46
Tableau III.1 : Temporisations T37 à T44.....	61
Tableau III.2 : Les étapes de pompages P1 & P2.....	63
Tableau III.3 : Sorties EV1 à EV4.....	63

Tableau III.4 : Alarmes — Warnings & Défauts P1 / P2.....	64
--	-----------

LISTE DES SYMBOLES

API : Automate Programmable Industriel

IHM: Interface Homme-Machine

CPU: Central Processing Unit

DI: Digital Input

DO: Digital Output

AI: Analog Input

AO: Analog Output

TOR : Tout Ou Rien

EV : Électrovanne

EVA : Électrovanne Zone A

EVB : Électrovanne Zone B

EVC : Électrovanne Zone C

EVD : Électrovanne Zone D

EVP1 : Électrovanne Pompe 1

EVP2 : Électrovanne Pompe 2

SM : Signal Module

HMT : Hauteur Manométrique Totale

ETP : Évapotranspiration Potentielle

Etc. : Évapotranspiration de la culture

EUT : Eaux Usées Traitées

KNX : Konnex

FDR: Frequency Domain Reflectometry

IEPE: Integrated Electronics Piézoélectrique

DOL : Direct On Line

BP : Bouton-Poussoir

HP : Haute Pression

LP: Low Pressure / Base Pression

GSM: Global System for Mobile Communications

GPRS: General Packet Radio Service

PROFINET: Process Field Network

TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol

RJ45: Registered Jack 45

IP: Ingress Protection / Internet Protocol

TIA: Totally Integrated Automation

SFC: Sequential Function Chart

ST: Structured Text

IL : Instruction List

Ladder : Ladder Diagram

NF : Normalement Fermé

NO: Normalement Ouvert

AC: Alternating Current

DC: Direct Current

Hz: Hertz

KW: Kilowatt

KVA: Kilovolt-Ampere

A: Ampère

V: Volt

Bar: Bar

M : Mètre

M² : Mètre carré

M³ : Mètre cube

Mm : Millimètre

cm : Centimètre

Km : Kilomètre

H : Heure

Min : Minute

S : Seconde

Ms : Milliseconde

°C : Degré Celsius

Ω : Ohm

Mm² : Millimètre carré

DN : Diamètre Nominal

DB: Decibel isotropic

LED: Light Emitting Diode

LCD: Liquid Crystal Display

TFT: Thin Film Transistor

SMS: Short Message Service

SIM: Subscriber Identity Module

AL : Alarme

KM : Contacteur (K = contacteur, M = moteur)

Q : Quantité / Débit

P : Pression

NIV : Niveau

PLC: Programmable Logic Controller

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

P_OK : Pression OK

FUITE : Fuite détectée

NIV_BAS : Niveau Bas

S7-1200 : Siemens SIMATIC S7-1200

KTP700 : Siemens KTP700 Basic

CP 1243-1 : Siemens CP 1243-1

SM 1231 : Siemens SM 1231

6ES7214-1AG40-0XB0 : Référence CPU S7-1200 1214C DC/DC/DC

6ES7231-4HF32-0XB0 : Référence SM 1231 AI 8×13 bits

6AV2123-2GB03-0AX0 : Référence KTP700 Basic

6GK7243-1BX30-0XE0 : Référence CP 1243-1

3RT2 : Siemens 3RT2

3RU2 : Siemens 3RU2

3VA1 : Siemens 3VA1

6EP1332-1SH71 : Siemens 6EP1332-1SH71

LIYCY : Câble blindé

U1000R2V : Câble de puissance

Introduction générale

L'eau constitue le pilier fondamental de la vie sur Terre et le moteur essentiel de tout développement biologique. Dans un contexte mondial marqué par une croissance démographique galopante et une pression climatique accrue, la sécurité alimentaire est devenue un défi majeur. L'agriculture, premier consommateur de ressources hydriques, se retrouve aujourd'hui au cœur d'une équation complexe : produire davantage avec des ressources de plus en plus limitées.

Face à l'irrégularité des précipitations dans de nombreuses régions du globe, l'irrigation ne relève plus du simple appoint, mais d'une nécessité stratégique pour garantir la pérennité et la qualité des rendements agricoles [1]. Si les méthodes traditionnelles ont longtemps prévalu, l'évolution technologique ouvre désormais la voie à une gestion plus rationnelle et précise de l'eau. Bien que les terres irriguées ne représentent qu'une fraction de la surface cultivable mondiale, leur contribution à la production globale reste prédominante. Dans ce sens, l'intégration de l'automatisation et des technologies intelligentes promet de décupler cette productivité tout en préservant la ressource [2].

C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet de fin d'études. Nous explorons ici la conception et la mise en œuvre d'un système d'irrigation intelligent, piloté par un Automate Programmable Industriel (API). L'objectif est de substituer à l'intervention manuelle un contrôle automatisé rigoureux, capable d'optimiser chaque goutte d'eau et de maximiser l'efficacité agronomique.

Pour mener à bien cette étude, notre mémoire est structuré en trois chapitres :

Le Chapitre I, intitulé « Aperçu Général des Systèmes d'Irrigation en Agriculture », pose le cadre théorique en présentant les fondements de l'irrigation, ses enjeux actuels et l'évolution des techniques de gestion de l'eau.

Le Chapitre II, dédié à l'« Architecture du Système et Composants Matériels », détaille la configuration globale de notre solution ainsi que les caractéristiques techniques des différents éléments matériels (capteurs, actionneurs et API) sélectionnés.

Le Chapitre III, axé sur l'« Étude Technique et Réalisation du Système », est consacré à la programmation de l'automate, aux simulations et à la mise en œuvre concrète du système d'irrigation automatisé.

Chapitre I

**Aperçu Général des Systèmes d'Irrigation en
Agriculture**

I.1. Introduction

L'eau constitue le pilier fondamental de la vie et le levier essentiel du développement agricole. Aujourd'hui, face à une croissance démographique mondiale constante, la demande alimentaire s'intensifie, imposant un défi de taille : produire davantage avec des ressources hydriques de plus en plus limitées. Dans de nombreuses régions, l'irrégularité des précipitations et les changements climatiques rendent l'irrigation artificielle indispensable pour garantir la pérennité des cultures et la stabilité des rendements [2,11].

Historiquement, les pratiques d'irrigation ont évolué des simples canaux de terre vers des dispositifs technologiques avancés. Bien que les surfaces irriguées ne représentent qu'une minorité des terres cultivées, elles fournissent une part prédominante de la production alimentaire mondiale. L'enjeu actuel réside désormais dans la transition vers une « irrigation intelligente », capable de maximiser cette productivité tout en évitant le gaspillage de la ressource [11].

Ce premier chapitre dresse un état des lieux des pratiques d'irrigation en agriculture. Nous y analyserons l'importance vitale de l'eau, l'évolution historique et technique des systèmes d'arrosage, et enfin, l'apport crucial de l'automatisation par Automate Programmable Industriel (API) pour une gestion moderne, précise et efficiente de cette ressource précieuse.

I.2. Fondamentaux de l'irrigation :

L'irrigation constitue un levier essentiel de la production agricole, en particulier dans les régions caractérisées par des précipitations insuffisantes ou irrégulières. Elle repose sur un ensemble de principes scientifiques et techniques visant à apporter à la culture la quantité d'eau nécessaire, de manière efficiente et contrôlée [1- 3].

Les fondements d'une gestion rigoureuse de l'irrigation s'articulent autour des axes suivants : [1]

- **L'évaluation des besoins hydriques** : Cette étape exige une compréhension approfondie des besoins en eau des cultures à chaque **stade phénologique**, tout en intégrant les variations liées à l'espèce, à la variété et aux conditions microclimatiques environnantes.
- **La caractérisation physico-hydrrique du sol** : Elle nécessite la connaissance précise des propriétés du substrat, notamment sa texture, sa structure, sa capacité de rétention en eau (réserve utile) et sa conductivité hydraulique.
- **Le choix de la méthode d'irrigation** : Cette décision doit être raisonnée et adaptée aux contraintes agronomiques, topographiques, techniques et économiques propres à chaque exploitation.

- **Le pilotage du calendrier d'arrosage** : Il implique une planification stricte des apports et des doses d'eau afin de satisfaire les besoins réels de la plante, tout en limitant les pertes par percolation profonde, par ruissellement ou par évaporation.
- **L'intégration des paramètres climatiques locaux** : La prise en compte de variables telles que la température, la vitesse du vent et l'humidité relative de l'air est indispensable, car elles influencent directement l'évapotranspiration potentielle (ETP) et, par conséquent, les besoins nets en eau des cultures.

I.2.1. Définition de l'irrigation :

Irrigation est l'ensemble des techniques consistant à apporter artificiellement de l'eau au sol afin de compenser le manque de précipitations et de satisfaire les besoins hydriques des plantes à différents stades de leur développement [2, 3]. Elle permet :

- De réguler la croissance des cultures.
- D'améliorer la qualité des productions.
- De prévenir le stress hydrique.

I.2.2. Objectifs de l'irrigation :

Les principaux objectifs de l'irrigation sont :

- Fournir l'eau nécessaire aux plantes à chaque stade phénologique afin d'assurer un développement végétatif optimal.
- Accroître la production agricole en quantité et en qualité grâce à une alimentation hydrique régulière et maîtrisée tout au long du cycle cultural.
- Garantir la stabilité des rendements face aux aléas climatiques et aux fluctuations interannuelles des précipitations.
- Atténuer les effets néfastes des épisodes de sécheresse sur la physiologie et la productivité des cultures.
- Permettre la pratique de cultures hors saison, affranchissant ainsi la production agricole des contraintes climatiques saisonnières.
- Favoriser l'absorption racinaire des éléments nutritifs essentiels, la disponibilité en eau conditionnant directement leur mobilité dans la solution du sol.

I.2.3. Les sources d'eau en agriculture :

Les principales sources d'eau exploitées en agriculture se déclinent de la manière suivante :

- 1. Les eaux de surface** : Cette catégorie regroupe les cours d'eau (rivières, fleuves), les lacs naturels ainsi que les retenues artificielles telles que les barrages et les retenues

collinaires. Bien que ces ressources soient généralement faciles d'accès et permettent des débits de pompage importants, leur disponibilité reste fortement tributaire des conditions climatiques, de la saisonnalité et des variations de précipitations.



Figure I.1 : Les eaux de surface [3].

2. **Les eaux souterraines :** Cette ressource comprend les nappes phréatiques, les nappes captives ainsi que les aquifères profonds, exploités principalement par le biais de puits et de forages (voir Figure I.2). Contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines offrent une disponibilité plus stable et sont mieux protégées contre l'évaporation directe. Cependant, leur exploitation impose des coûts énergétiques élevés pour l'extraction (pompage) et nécessite une gestion rigoureuse pour éviter l'épuisement des réserves ou les phénomènes de salinisation [3].

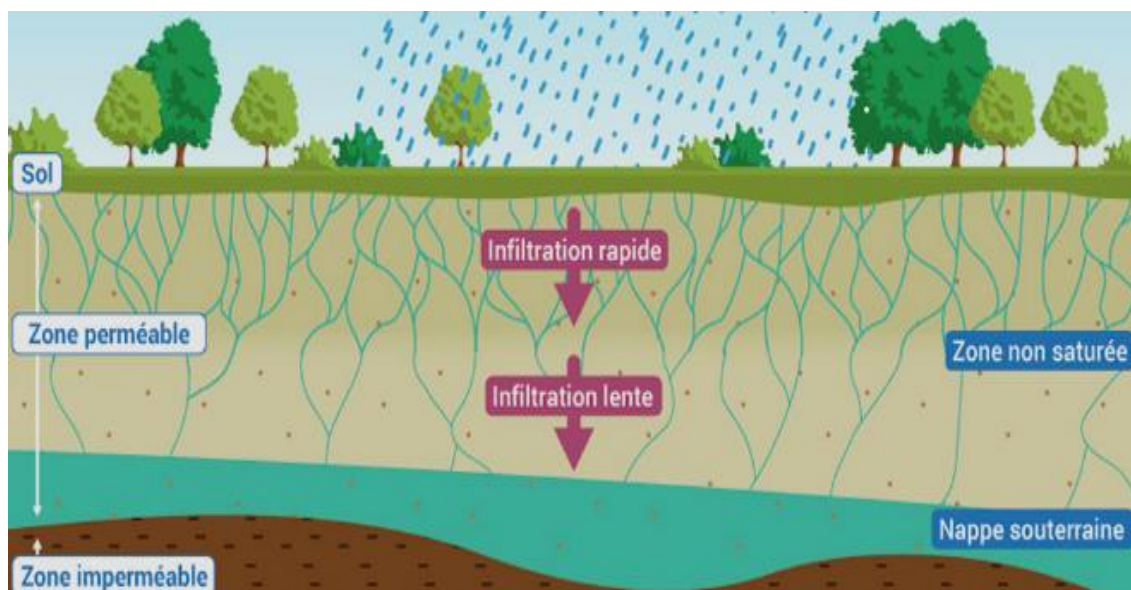


Figure I.2 : Les eaux souterraines [3].

3. **Les eaux de pluie** : Cette source repose sur la collecte et le stockage des précipitations directes, souvent via des systèmes de citernes, de bassins de rétention ou de réservoirs dédiés. Bien qu'il s'agisse d'une ressource naturelle, gratuite et de bonne qualité chimique (faible salinité), sa disponibilité demeure intrinsèquement irrégulière et hautement dépendante des aléas météorologiques, ce qui en fait une solution d'appoint plutôt qu'une source principale pour les grandes cultures.

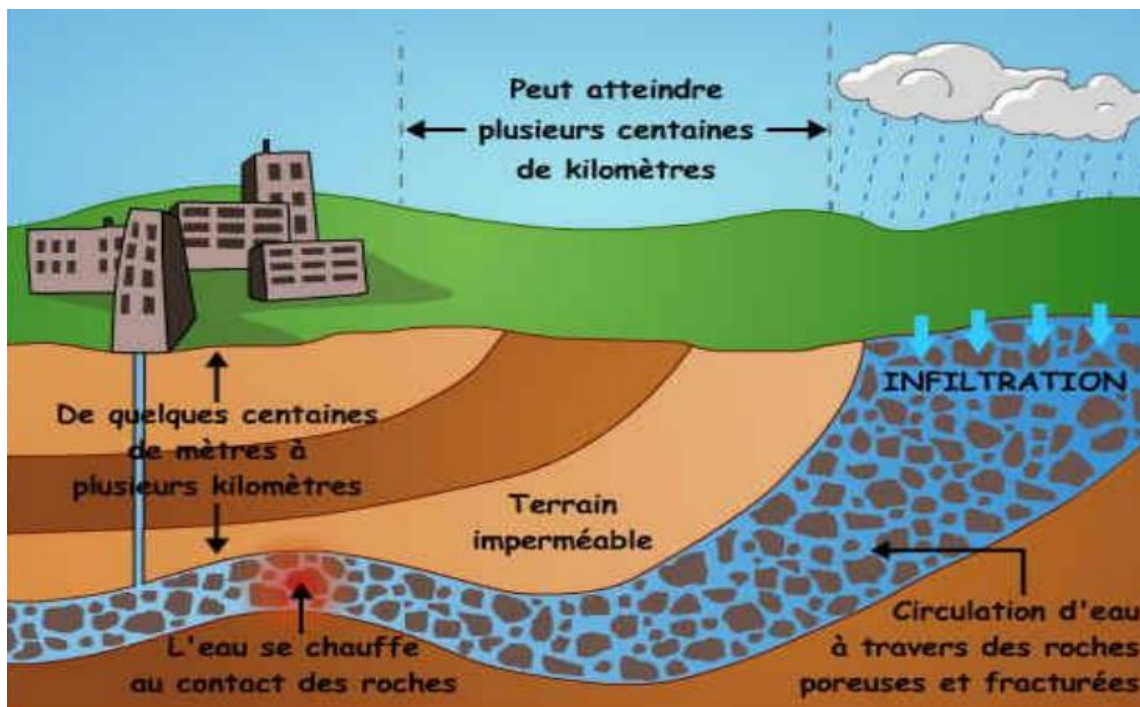


Figure I.3 : Les eaux de pluie 1 [3].

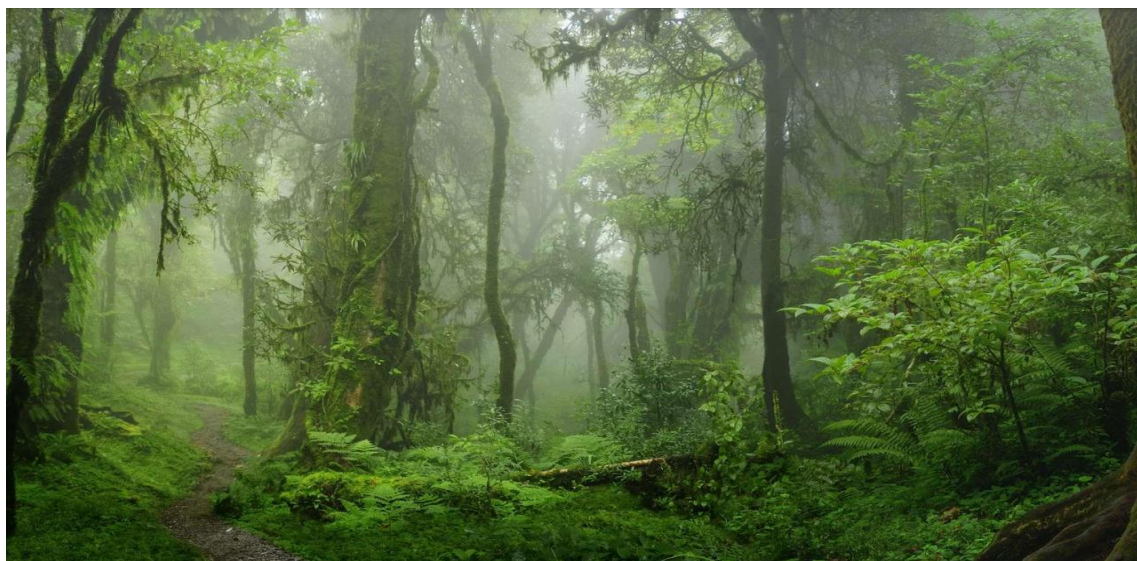


Figure I.4 : Les eaux de pluie 2 [3].

- 4. Les eaux usées traitées (EUT) :** Cette ressource, dite non conventionnelle, repose sur la réutilisation des effluents domestiques ou industriels après un passage en station d'épuration (voir Figure I.5). Elle représente une alternative stratégique majeure, particulièrement dans les régions arides et semi-arides confrontées au stress hydrique. En plus de préserver les réserves d'eau douce, l'usage de ces eaux riches en éléments nutritifs permet de soutenir l'économie circulaire en agriculture, à condition de respecter des normes sanitaires strictes.



Figure I.5 : Les eaux usées traitées [3-11].

I.3. Classification et Évolution des Méthodes d'Irrigation

Les techniques d'irrigation ont connu une mutation profonde au fil du temps, évoluant des pratiques traditionnelles d'inondation vers des systèmes modernes hautement technologiques et localisés. Cette transition historique et technique répond à des exigences de durabilité et s'articule autour de trois objectifs majeurs [2- 4]:

- La minimisation drastique des pertes d'eau : L'évolution vise à réduire l'impact des phénomènes dissipatifs majeurs tels que l'évaporation directe lors de l'arrosage, le ruissellement de surface et la percolation profonde hors de la zone racinaire.
- L'optimisation de l'efficience d'application : Il s'agit de maximiser le ratio entre le volume d'eau réellement absorbé par l'appareil racinaire de la culture et le volume total prélevé à la source, garantissant ainsi un meilleur rendement par mètre cube consommé.
- La simplification et la précision du pilotage : Les systèmes modernes intègrent des dispositifs hydrauliques et électroniques avancés permettant de contrôler rigoureusement les débits, d'ajuster les fréquences d'apport en temps réel et de faciliter l'automatisation globale des réseaux de distribution.



Figure I.6 : Méthodes d'Irrigation[2- 4].

I.3.1. Irrigation de surface (Gravitaire) :

L'irrigation de surface, communément appelée irrigation gravitaire, est la méthode la plus ancienne. Elle consiste à distribuer et à faire circuler l'eau directement à la surface du sol en exploitant uniquement la force de gravité (voir Figure I.7) [2- 3].

Selon la topographie du terrain et le type de culture, cette méthode se décline en trois variantes principales :

- L'irrigation par submersion : Le champ est entièrement inondé sous une fine couche d'eau stagnante ou courante, une technique principalement utilisée pour la riziculture.
- L'irrigation en bassins : La parcelle est divisée en plusieurs compartiments fermés par des diguettes, permettant de retenir l'eau autour d'arbres fruitiers ou de cultures spécifiques.
- L'irrigation en sillons : L'eau s'écoule par gravité le long de petits canaux parallèles (les sillons) creusés entre les rangées de cultures, limitant le contact direct de l'eau avec la base de la plante.

Cette technique traditionnelle présente des caractéristiques contrastées :

Avantages :

- Simplicité opérationnelle : Sa mise en œuvre ne requiert aucune compétence technique complexe pour l'exploitant.
- Faible coût d'installation : Elle s'affranchit d'investissements matériels lourds et ne nécessite aucune pression hydraulique, annulant ainsi les coûts énergétiques de pompage.

Inconvénients :

- Faible efficacité hydrique : Elle engendre une consommation d'eau excessive et disproportionnée par rapport aux besoins réels de la plante.
- Pertes dissipatives majeures : Une part importante de la ressource est perdue par évaporation directe à l'air libre et par percolation profonde (infiltration excessive hors de la zone racinaire).
- Hétérogénéité de la distribution : La répartition de l'eau reste très inégale sur la parcelle, provoquant souvent une saturation en amont et un déficit en aval.



Figure I.7 : Irrigation de surface[2].

I.3.2. Irrigation par aspersion :

L'irrigation par aspersion est une technique sous pression qui consiste à distribuer l'eau à la parcelle sous forme de pluie artificielle. L'eau est acheminée à travers un réseau de conduites fermées avant d'être projetée dans l'air par des diffuseurs ou des asperseurs rotatifs, pour ensuite retomber sur le sol et le couvert végétal [1- 4].

Cette méthode, largement répandue en grandes cultures, présente des caractéristiques spécifiques : [1, 2]

Avantages :

- Excellente uniformité de répartition : Par rapport à la méthode gravitaire, elle garantit un arrosage beaucoup plus homogène sur l'ensemble de la surface cultivée, favorisant une levée régulière des cultures.

- Grande polyvalence topographique : Elle s'adapte à une grande diversité de reliefs (terrains vallonnés ou en pente) ainsi qu'à une large gamme de textures de sols, sans exiger un nivellement préalable de la parcelle. [1- 3]

Inconvénients :

- Forte sensibilité aux conditions éoliennes : La dérive due au vent perturbe la trajectoire des gouttelettes, ce qui dégrade l'hétérogénéité de la distribution et peut créer des zones de sous-irrigation ou de sur-irrigation.
- Consommation énergétique accrue : Contrairement aux systèmes gravitaires, l'aspersion requiert le maintien d'une pression hydraulique minimale constante dans le réseau, ce qui augmente les coûts de pompage énergétique.
- Pertes par évaporation directe : Une fraction non négligeable de la ressource s'évapore dans l'air ou à la surface des feuilles (pertes par interception foliaire) avant de parvenir efficacement au système racinaire.



Figure I.8 : Irrigation par aspersion[4].

I.3.3. Micro-irrigation (Goutte-à-goutte) :

L'eau est apportée directement au niveau des racines sous forme de gouttes[4- 9]..

Avantage :

- Très haute efficacité.
- Économie d'eau importante.
- Réduction des mauvaises herbes.

Inconvénients :

- Coût d'installation élevé.
- Risque de colmatage.



Figure I.8 : Micro-irrigation (Goutte-à-goutte) [4, 9].

I.3.4. Irrigation Souterraine :

L'irrigation souterraine est une technique d'irrigation dans laquelle l'eau est distribuée sous la surface du sol à l'aide de conduites ou de tuyaux enterrés. Elle permet d'apporter l'eau directement à la zone racinaire des plantes, assurant ainsi une meilleure absorption et une utilisation optimale des ressources hydriques. Ce système limite les pertes d'eau par évaporation et améliore l'efficacité globale de l'irrigation[3- 4].



Figure I.9 : Irrigation Souterraine.

Avantage :

- Très haute efficacité.
- Économie d'eau importante.
- Réduction des mauvaises herbes.

Inconvénients :

- Coût d'installation élevé.
- Entretien difficile.
- Risque de colmatage des conduites.

I.3.5. Comparaison des performances :

Le tableau suivant synthétise les performances des trois principaux systèmes d'irrigation selon leurs critères techniques et économiques.

Méthode d'irrigation	Consommation d'eau	Efficacité	Coût	Contrôle
Irrigation de surface	Élevée	Faible	Faible	Faible
Aspersion	Moyenne	Bonne	Moyen	Moyen
Goutte-à-goutte	Faible	Élevée	Élevé	Élevé

Tableau I.1: Tableau de Comparaison des performances.

I.4. Les besoins en eau des cultures :

Les besoins en eau des plantes correspondent à la quantité d'eau nécessaire pour compenser les pertes par évapotranspiration. Ils varient en fonction de plusieurs facteurs : [1]

- Le type de culture : Chaque espèce possède des exigences hydriques spécifiques.
- Le stade de croissance : Les besoins augmentent généralement de la germination jusqu'à la phase de fructification.
- Les conditions climatiques : Le rayonnement global, la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent accélèrent ou ralentissent la transpiration.
- La nature du sol : La texture et la structure du sol déterminent sa capacité de rétention en eau (réserve utile).
- Ces besoins sont quantifiés par l'évapotranspiration de la culture (ET_c), généralement exprimée en millimètres par jour (mm/j). [1, 2]

I.4.1. Paramètres influençant l'irrigation :

La planification d'un apport d'eau optimal dépend de cinq paramètres majeurs :

1. Le climat : Prise en compte de la température, de la vitesse du vent et de l'humidité relative.
2. Le type de sol : Évaluation de la vitesse d'infiltration et de la capacité de stockage.
3. La culture : Identification des sensibilités variétales au stress hydrique.
4. Le stade de développement : Ajustement selon le calendrier phénologique de la plante.
5. La qualité de l'eau : Analyse de la salinité et de la présence de matières en suspension pour éviter le colmatage des systèmes.

I.4.2. Le pilotage de l'irrigation :

Le pilotage consiste à appliquer la bonne dose d'eau au bon moment, garantissant une gestion efficiente de la ressource. [5]

Méthodes de gestion :

- Irrigation manuelle : Déclenchement basé uniquement sur l'observation visuelle de la plante ou du sol par l'opérateur.
- Irrigation programmée : Automatisation simple à l'aide de minuteurs ou de programmeurs horaires cycliques.
- Irrigation intelligente : Automatisation avancée basée sur des cartes Arduino ou microcontrôleurs, connectés à des capteurs d'humidité du sol et des stations météo.

Objectifs majeurs :

- Économie l'eau : Moins de pertes par infiltration ou ruissellement.
- Optimiser le rendement : Maintien de la plante dans des conditions de confort hydrique favorables à sa productivité.
- Prévenir les anomalies : Éviter l'asphyxie racinaire due au surdosage ou le flétrissement lié au manque d'eau.

I.4.3. Paramètres d'irrigation par culture :

Le tableau suivant présente les seuils d'humidité du sol, la profondeur d'implantation des capteurs ainsi que le volume d'eau requis par cycle pour les principales cultures.

Culture	Profondeur capteur (cm)	Seuil min (%)	Seuil max (%)	Pompe-t-ON	Pompe OFF	Eau / cycle (mm)
Blé	30 – 50	50%	75%	< 50%	≥ 75%	25 – 35 mm
Pomme de terre	25 – 40	60%	80%	< 60%	≥ 80%	30 – 40 mm
Tomate	20 – 40	65%	85%	< 65%	≥ 85%	20 – 30 mm
Oignon	15 – 30	55%	75%	< 55%	≥ 75%	15 – 25 mm
Carotte	20 – 30	60%	80%	< 60%	≥ 80%	20 – 30 mm
Laitue	15 – 25	65%	85%	< 65%	≥ 85%	15 – 25 mm
Poivron	25 – 40	65%	85%	< 65%	≥ 85%	25 – 35 mm
Concombre	25 – 40	70%	90%	< 70%	≥ 90%	25 – 40 mm
Olivier	50 – 80	40%	65%	< 40%	≥ 65%	40 – 60 mm
Oranger	60 – 100	65%	85%	< 65%	≥ 85%	50 – 70 mm
Pommier	50 – 80	60%	80%	< 60%	≥ 80%	40 – 60 mm

Tableau I.2 : Paramètres d'irrigation et seuils de pilotage par culture [2, 3 , 11].

I.5. L'Irrigation intelligente et l'automatisation :

L'irrigation intelligente constitue une évolution majeure de l'agriculture moderne. Elle repose sur l'intégration de systèmes automatisés et de capteurs environnementaux. Ces technologies permettent une gestion précise et optimisée de l'eau selon les besoins réels des cultures. Cette approche vise à maximiser la productivité agricole tout en minimisant le gaspillage des ressources hydriques [1,6].

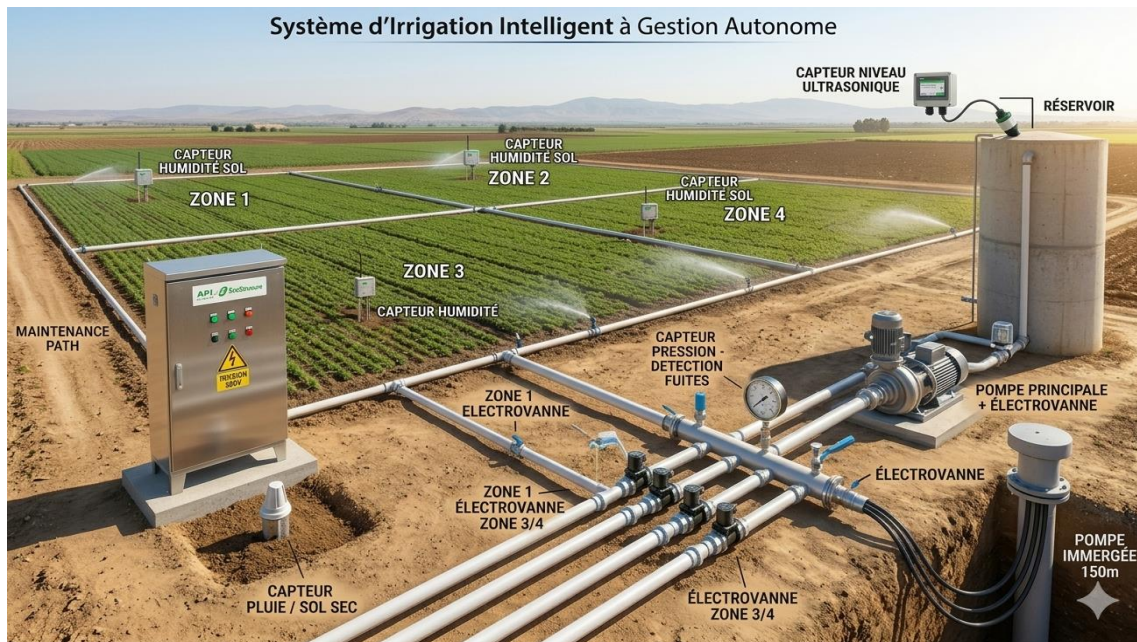


Figure I.10. L'Irrigation Intelligente et l'Automatisation.

I.5.1. Limites des systèmes manuels :

Dépendance à l'intervention humaine : Ces systèmes exigent une présence constante de l'opérateur pour déclencher ou interrompre l'irrigation. Cette contrainte devient critique et difficilement gérable sur de grandes surfaces agricoles.

Hétérogénéité de la répartition de l'eau : L'absence de régulation automatique entraîne une distribution non uniforme. Cela provoque simultanément des zones de surirrigation (asphyxie) et des zones de sous-irrigation (stress hydrique).

Inefficience des ressources : Le manque de précision dans la gestion du débit et des temps d'arrosage génère un gaspillage important d'eau et d'énergie.

Faible fiabilité opérationnelle : Le système est vulnérable aux erreurs ou aux absences humaines. Un retard d'intervention peut impacter l'état sanitaire des cultures et causer des pertes de rendement majeures [6, 7].

I.5.2. Concept de l'irrigation intelligente :

L'irrigation intelligente est un système automatisé en boucle fermée [1, 14]. Il intègre des capteurs, des actionneurs et un contrôleur logique. Cet ensemble permet d'ajuster

dynamiquement les apports d'eau en fonction des conditions réelles et en temps réel du sol et du climat.

I.5.2.1. Architecture générale :

L'architecture du système s'articule autour de trois blocs fonctionnels principaux :

- Les capteurs : Ils mesurent les grandeurs physiques du milieu (humidité du sol, pluviométrie, pression, niveau de cuve, débit).
- L'unité de traitement et de commande : Centralisée autour d'un Automate Programmable Industriel (API) ou d'un microcontrôleur, elle traite les signaux d'entrée et exécute l'algorithme de contrôle.
- Les actionneurs : Ils exécutent les ordres physiques de l'unité de commande (motopompes, électrovannes).

I.5.2.2. Logique de fonctionnement :

Le cycle opérationnel du système suit une approche séquentielle en boucle fermée :

1. Acquisition et analyse : Collecte et traitement des données environnementales en temps réel.
2. Prise de décision : Comparaison automatisée des mesures avec les seuils critiques préprogrammés.
3. Actionnement : Commutation automatique (activation ou arrêt) des organes d'irrigation.

I.5.2.3. Gestion sectorisée (par zones) :

Le fractionnement du terrain en plusieurs secteurs indépendants permet de répondre précisément à l'hétérogénéité des parcelles (différences de cultures, de types de sol ou d'exposition). Cette gestion sectorisée optimise l'utilisation de la ressource hydrique. Chaque zone dispose d'une autonomie complète grâce au pilotage individuel de son électrovanne dédiée.

I.5.2.4. Capteurs intégrés au système :

L'acquisition des données environnementales repose sur un ensemble de capteurs connectés. Ces dispositifs convertissent les grandeurs physiques du milieu en signaux électriques exploitables par l'unité de commande. Ils assurent la surveillance continue des paramètres hydriques et climatiques afin de garantir la précision du système d'irrigation [5].

a) Capteurs d'humidité du sol :

- Mesure: Ils évaluent en continu le taux d'humidité du sol au sein de chaque zone irriguée.
- Rôle : Ils déterminent le besoin hydrique réel des cultures pour déclencher l'irrigation au seuil optimal.



Figure I.11 : les Capteurs [5].

b) Capteur de pluie :



Figure I.12 : KNX - détecteur de pluie[5, 8].

- Détecte les précipitations naturelles.
- Permet l'arrêt automatique du système en cas de pluie.

c) Capteur de niveau (ultrasonique) :



Figure I.13 : Capteur de niveau (ultrasonique).

- Mesure le niveau d'eau dans le réservoir
- Protège contre le manque d'eau et les dommages aux pompes

d) Capteur de débit :**Figure I.14 :** Capteur de débit.

- Mesure la quantité d'eau distribuée dans le réseau
- Détecte les anomalies et fuites éventuelles

e) Capteur de pression :

- Assure la sécurité du réseau hydraulique
- Détecte les surpressions et les chutes de pression anormales

**Figure I.15 :** Capteur de pression.**I.5.2.5. Système de pompage et réservoir :****a) Réservoir :**

- Stocke l'eau avant distribution vers les zones
- Assure une alimentation continue du système d'irrigation



Figure I.16 : Réservoir.

b) Pompes :



Figure I.17 : les pompes industrielles.



Figure I.18 : les pompes immergées.

- 1 pompe immergée pour le remplissage du réservoir
- 2 pompes industrielles pour la distribution dans les zones
- Redondance pour assurer la continuité de service

I.5.2.6. Système de distribution par zones :

Le champ est divisé en 4 zones indépendantes. Chaque zone est contrôlée par une électrovanne et l'API active les zones selon les besoins en eau détectés par les capteurs d'humidité [7].

I.5.2.7. Méthode de fonctionnement globale :

- Remplissage du réservoir
- Mise en pression du réseau hydraulique

- Lecture des capteurs (humidité, niveau, débit, pression, pluie)
- Analyse par l'API selon les seuils programmés
- Activation des électrovannes des zones concernées
- Irrigation des zones
- Arrêt automatique à l'atteinte du seuil d'humidité optimal

I.5.2.8. Détection de fuite (diagnostic par pression) :

En cas de chute de pression anormale, le système engage une procédure de diagnostic séquentiel :

- Test de chaque zone isolément : Zone 1 → 2 → 3 → 4
- Puis test des combinaisons : 1+2, 1+3, 1+4, 2+3, 2+4, 3+4
- Localisation précise de la zone défectueuse

État	Capteur	Valeur / Seuil	Signal API	Action déclenchée
Normale Pression OK	Capteur HP Capteur LP	$P_{\min} \leq P \leq P_{\max}$ ex. 3 – 6 bar	P_OK = 1 (Entrée num.)	► Pompe distribution active
Haute pression Surpression (HP)	Capteur HP (pressostat)	$P > P_{\max}$ ex. $P > 6$ bar	HP = 1 (Entrée num.)	► Arrêt immédiat pompes + vannes
Basse pression Sous-pression	Capteur LP (pressostat)	$P < P_{\min}$ ex. $P < 3$ bar	LP = 1 (Entrée num.)	► Arrêt pompe distribution
Fuite détectée Anomalie réseau	Capteur LP + capteur débit	P chute + Q élevé sans conso. normale	FUITE = 1 (Bit interne)	► Test zones 1→4 Localisation zone
Réservoir vide Niveau bas	Capteur niveau (ultrasonique)	Niveau < Seuil_bas → P réseau chute	NIV_BAS = 1 (Entrée num.)	► Arrêt pompe distrib. Démarrage pompe

Tableau I. 3 : des états de pression [14].

I.5.2.9. Comparaison avant / après automatisation :

Le tableau suivant récapitule les améliorations apportées par la transition d'une gestion manuelle à un système d'irrigation automatisé.

Facteur	Avant (manuel)	Après (automatique)
☐ Croissance des plantes	Irrégulière	Régulière
☐ Productivité	Moyenne	Élevée
☐ Qualité de la récolte	Ordinaire	Très bonne
☐ Consommation d'eau	Élevée	Faible
☐ Effort humain	Important	Faible

Tableau I.4 : Comparaison avant / après automatisation [1, 6].

I.5.3. Introduction à l'Automate Programmable Industriel (API) :

L'Automate Programmable Industriel (API) est un dispositif électronique robuste conçu pour piloter en temps réel des processus industriels et agricoles. Il acquiert et traite les signaux logiques ou analogiques émis par les capteurs, puis génère des ordres de commande vers les actionneurs selon un algorithme de commande préprogrammé [1, 6, 10].

I.5.3.1. Rôle dans le système d'irrigation :

L'Automate Programmable Industriel (API) constitue le cœur décisionnel de l'installation. Il assure de manière autonome les fonctions suivantes :

- L'acquisition et le traitement des données provenant des différents capteurs du système.
- La prise de décision automatique en temps réel, basée sur l'analyse descriptive de l'environnement.
- Le contrôle des actionneurs, en régulant l'activation et le blocage des motopompes et des électrovannes.

I.5.3.2. Cycle de fonctionnement de l'API :

L'automate exécute son programme de façon cyclique et séquentielle selon trois phases majeures :

- a) Acquisition des données (Lecture des entrées) : L'API scrute en continu l'état des entrées logiques et analogiques. Il enregistre les mesures de pression, d'humidité du sol, de niveau d'eau, de débit et de précipitations émises par les capteurs.
- b) Traitement logique (Exécution du programme) : Le microprocesseur applique les règles algorithmiques (logique combinatoire ou séquentielle de type IF / THEN) sur les variables d'entrée. Il compare les mesures en temps réel aux seuils critiques configurés dans sa mémoire.
- c) Commande des actionneurs (Mise à jour des sorties) : En fonction du résultat des équations logiques, l'API génère les signaux électriques de sortie nécessaires pour commuter (activer ou désactiver) les contacteurs des pompes et les bobines des électrovannes.

I.5.3.3. Exemple de logique de contrôle :

L'algorithme de gestion intègre des scénarios de régulation et de sécurité :

- Condition d'arrosage : Si l'humidité du sol < seuil minimal → Déclenchement de l'irrigation de la zone concernée.
- Priorité climatique : Si des précipitations sont détectées → Arrêt immédiat des cycles et inhibition des démarrages.

- Sécurité hydraulique : Si la pression du réseau $<$ seuil critique $\rightarrow$ Arrêt de sécurité et activation d'une alarme de diagnostic de fuite.
- Protection matérielle : Si le niveau du réservoir est insuffisant $\rightarrow$ Arrêt immédiat de la pompe pour prévenir la marche à sec.

I.5.3.4. Avantages de l'API :

L'intégration d'un API offre des performances supérieures aux architectures de commande classiques :

- Automatisation intégrale : Autonomie complète du processus d'irrigation sans intervention humaine directe.
- Robustesse industrielle : Haute résistance aux perturbations électromagnétiques, à la poussière et aux variations de température du milieu agricole.
- Déterminisme temporelle : Traitement des données en temps réel garantissant une vitesse de réponse quasi instantanée.
- Flexibilité opérationnelle : Facilité de maintenance, de diagnostic de pannes et de reprogrammation de l'algorithme face aux évolutions de l'exploitation.
- Évolutivité : Capacité d'adaptation logicielle à différents scénarios de culture ou configurations de parcelles [1].

I.6 Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de dresser un état des lieux global des pratiques d'irrigation en agriculture, en mettant en lumière l'évolution des techniques face aux exigences de durabilité actuelles [2-11]. L'étude comparative des méthodes conventionnelles a démontré que la maîtrise technique et l'efficacité d'application restent fortement dépendantes des infrastructures choisies, le goutte-à-goutte offrant les meilleures performances au prix d'un investissement initial plus élevé [3, 4, 9].

L'analyse des besoins en eau des cultures a rappelé que le pilotage de l'irrigation ne peut être empirique : il doit s'ajuster dynamiquement aux cycles physiologiques des plantes, aux propriétés hydrodynamiques du sol et aux fluctuations climatiques via le calcul précis de l'évapotranspiration (ETc) [3,11].

Enfin, l'introduction au concept d'irrigation intelligente et à l'architecture des Automates Programmables Industriels (API) ouvre la voie à la résolution des limites structurelles des systèmes manuels [1, 6, 7]. En transformant des parcelles hétérogènes en zones sectorisées et autonomes, monitorées en temps réel par un réseau de capteurs (humidité, pluie, niveau, pression) [5-8], l'API s'impose comme le cœur décisionnel indispensable pour optimiser chaque apport hydrique [1,14].

Ce panorama global des systèmes d'irrigation et de leurs paramètres de contrôle pose ainsi les fondations théoriques indispensables [2, 3, 4]. Il permet de transitionner logiquement vers le Chapitre II, dédié à l'Architecture du Système et Composants Matériels, où seront détaillés les choix technologiques et l'interconnexion des différents organes de notre installation.

Chapitre II

**Architecture du Système et Composants
Matériels**

II.1. Introduction :

La conception d'un système d'irrigation autonome performant repose avant tout sur un choix rigoureux des composants matériels qui le constituent. En effet, l'efficacité d'un tel système ne dépend pas uniquement des algorithmes de contrôle ou des stratégies de décision, mais également de la qualité et de la cohérence de l'architecture physique mise en place [6].

Dans le domaine de l'agriculture de précision, l'intégration de technologies industrielles éprouvées constitue un levier majeur pour améliorer la gestion des ressources hydriques et optimiser les rendements agricoles [7]. Les systèmes embarqués, les capteurs intelligents et les automates programmables jouent ainsi un rôle central dans la modernisation des pratiques d'irrigation [8].

Ce chapitre est consacré à la présentation détaillée de l'ensemble des éléments matériels constituant notre système. Nous commencerons par décrire l'automate programmable industriel (API), véritable cerveau du système, en expliquant son architecture interne et les raisons qui ont motivé son choix. Nous présenterons ensuite les capteurs pédoclimatiques ainsi que les actionneurs chargés d'exécuter les commandes d'irrigation. Enfin, nous aborderons l'architecture de communication reliant l'ensemble de ces composants.

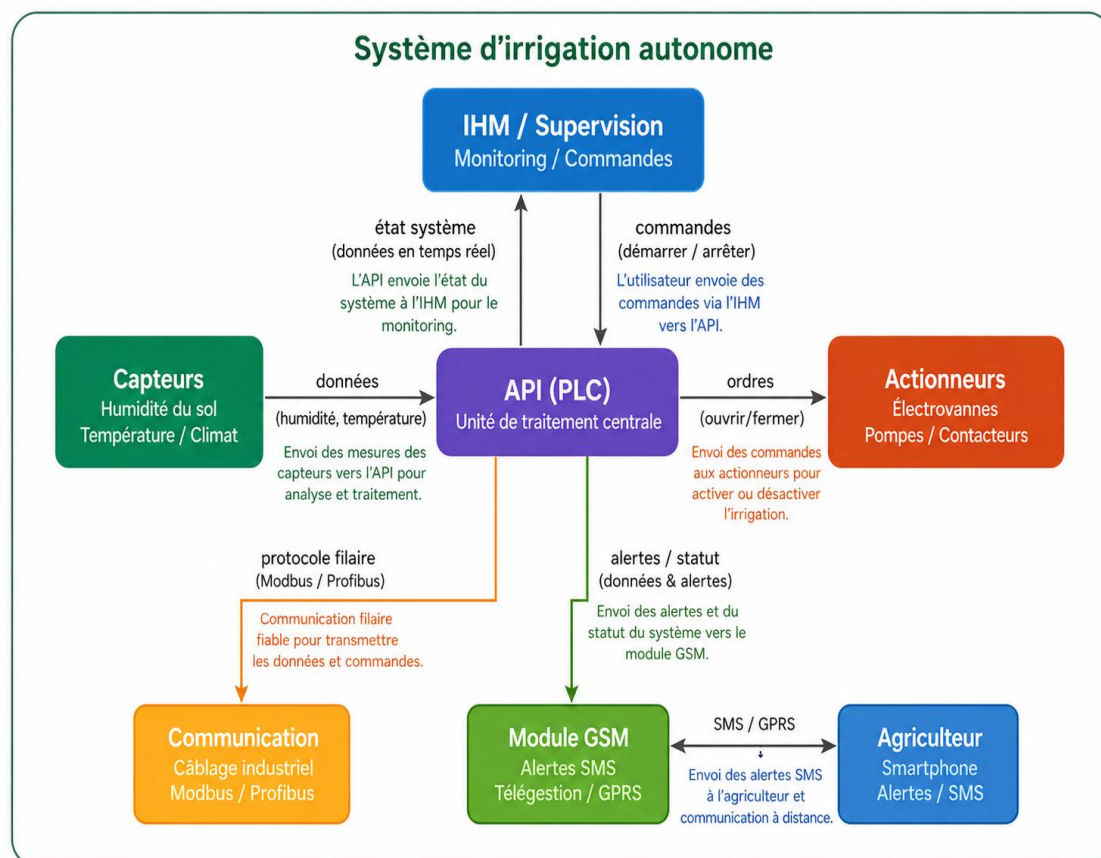


Figure II.1 : Diagramme de Système d'irrigation autonome.

II.2. Choix et Description de l'Unité de Contrôle Centrale :

II.2.1. Présentation de l'Automate Programmable Industriel (API) :

Un API (Automate Programmable Industriel) est un ordinateur industriel spécialisé conçu pour surveiller, contrôler et automatiser des équipements ou des processus de production. Il se compose généralement d'une unité centrale (CPU), de modules d'entrées/sorties (I/O), d'un bus de communication, et parfois d'un écran HMI intégré ou associé. Programmable via des langages normalisés par la norme CEI 61131-3 (comme le Ladder, le texte structuré ou le SFC), l'API est conçue pour des applications en temps réel avec une forte fiabilité [15].

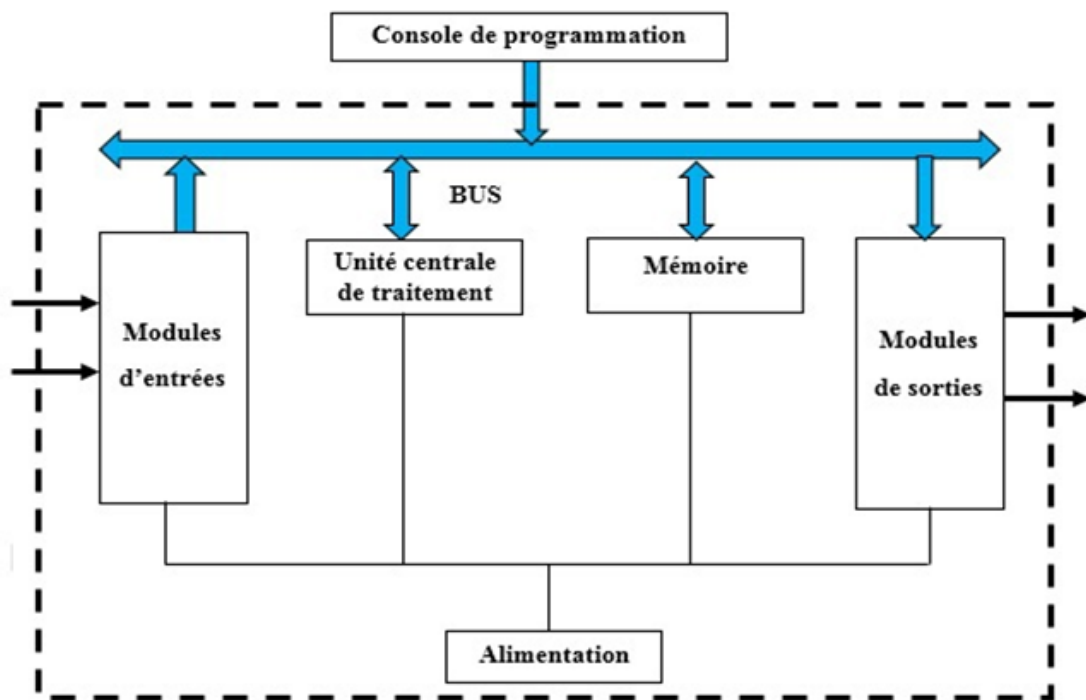


Figure II.2 : – Architecture interne d'un API[15]

Le fonctionnement repose sur le cycle de balayage (scan cycle) :

- Lecture des entrées : Mise à jour de la mémoire image des entrées
- Exécution du programme : Traitement logique selon le programme utilisateur
- Mise à jour des sorties : Écriture dans la mémoire image des sorties
- Gestion des communications : Échanges avec périphériques et autodiagnostic

Le temps de cycle du S7-1200 est garanti inférieur à 20 ms, ce qui est largement suffisant pour une application d'irrigation où les constantes de temps du sol se comptent en minutes, pas en millisecondes [15].

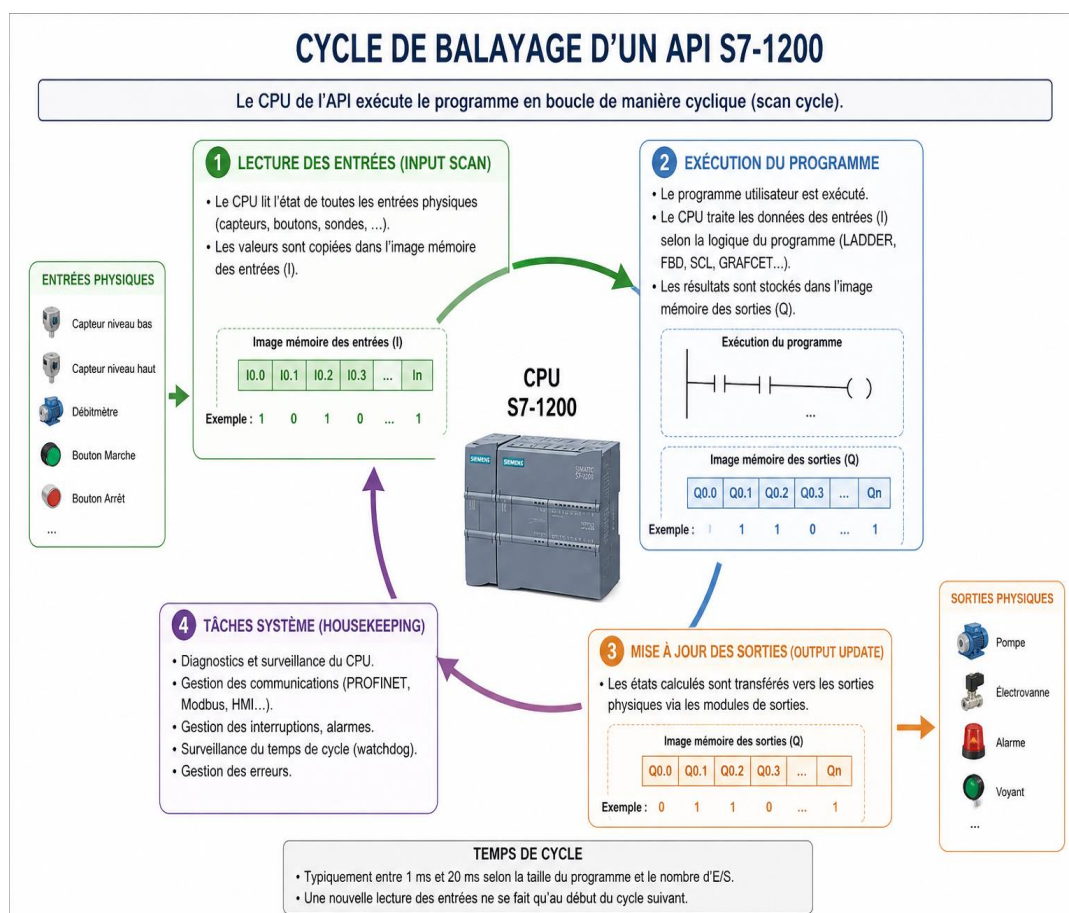


Figure II.3 : Cycle de balayage de l'API S7 1200 [15]

II.2.2. Pourquoi choisir un API plutôt qu'une carte type Arduino ? : Comparatif

technique entre un API Industriel et une Carte Arduino :

Critère	API Industriel	Carte Arduino
Robustesse mécanique	Boîtier IP20 en rack, IP55 avec armoire	Carte nue, sans protection
Plage de température	−20 °C à +60 °C	0 °C à +50 °C typique
Tolérance électrique	Protection surtension, inversion polarité	Aucune protection native
Cycle de vie	10–20 ans	Quelques années
Normes	CE, UL, IEC 61131-3	Aucune
Langages	Ladder, SFC, ST, IL	C/C++ uniquement
Communication industrielle	PROFINET, Modbus, PROFIBUS	Shields non standardisés
Support technique	Constructeur structuré	Communauté uniquement
Coût initial	Élevé	Très faible
Coût total de possession	Faible (fiabilité, maintenance)	Élevé (remplacements, débogage)

Tableau II.1 : Comparaison API vs Arduino [6, 7, 15 ,24].

Verdict : Pour un système déployé en milieu agricole, exposé aux intempéries, aux variations électriques et aux interventions non spécialisées, l'API est le seul choix viable. Arduino reste un outil de prototypage, pas de production [15].

II.2.3. Fonctionnement : le cycle de balayage et le déterminisme :

Le S7-1200 est un automate déterministe. Le temps de réponse entre une variation de capteur et la commande de sortie est borné et prévisible. Cette propriété est essentielle pour la sécurité : si le capteur de pression détecte une surpression, l'arrêt de la pompe doit intervenir dans un délai garanti, pas "dès que possible" [15].

II.2.4. Choix du modèle d'API et des modules d'extension :

a) Bilan des entrées/sorties du système :

Le dimensionnement repose sur l'inventaire exhaustif des signaux établi à partir du schéma d'implantation terrain [6, 7,24].

Type	Élément	Signal	Qté	Distance armoire	Notes
AI	Capteur de pluie	0-10 V	1	~5 m	Sur armoire, câble court
	Capteur de débit	4-20 mA	1	~10 m	Après les pompes
	Capteur de pression	4-20 mA	1	~10 m	En sortie Pmp immer
	Vibration Pompe 1	4-20 mA	1	~10 m	Sur corps de pompe
	Vibration Pompe 2	4-20 mA	1	~10 m	Sur corps de pompe
	Humidité Zone A	4-20 mA	1	~100 m	Ligne Nord, capteur représentatif
	Humidité Zone B	4-20 mA	1	~150 m	Ligne Nord, capteur représentatif
	Humidité Zone C	4-20 mA	1	~150 m	Ligne Sud, capteur représentatif
	Humidité Zone D	4-20 mA	1	~100 m	Ligne Sud, capteur représentatif
DI	Niveau BAS bassin	24V DC	1	~10 m	Flotteur, arrêt urgence
	Niveau MOYEN bassin	24V DC	1	~10 m	Seuil nominal
	Niveau HAUT bassin	24V DC	1	~10 m	Arrêt remplissage
	BP Start/Stop Pompe Immersée	24 V DC	2	~1 m	Local technique
	BP Start/Stop Pompe 1	24 V DC	2	~1 m	Local technique
	BP Start/Stop Pompe 2	24 V DC	2	~1 m	Local technique

DO	EV Zone A	220 V AC	1	~50 m	Irrigation sectorisée ligne Nord
	EV Zone B	220 V AC	1	~100 m	Irrigation sectorisée ligne Nord
	EV Zone C	220 V AC	1	~100 m	Irrigation sectorisée ligne Sud
	EV Zone D	220 V AC	1	~50 m	Irrigation sectorisée ligne Sud
	EV Pompe 1 (EVP1)	220 V AC	1	~10 m	Isolement hydraulique
	EV Pompe 2 (EVP2)	220 V AC	1	~10 m	Isolement hydraulique
	Contacteur Pompe 1	24 V DC	1	~10 m	Mise en route moteur
	Contacteur Pompe 2	24 V DC	1	~10 m	Mise en route moteur
	Contacteur Pompe Immergée	24 V DC	1	~150 m	Mise en route, forage

Tableau II.2 : Bilan des entrées/sorties du système[15].

Justification des signaux 4-20 mA pour les capteurs de terrain :

Les capteurs d'humidité des zones B et C sont situés à 150 m de l'armoire. Sur une distance aussi longue, un signal 0-10 V subirait une chute de tension significative due à la résistance linéique du câble (typiquement 0,05 Ω /m pour du 0,5 mm²). À 150 m (300 m aller-retour), la résistance de boucle est de 15 Ω . Avec une consommation de 20 mA du capteur, la chute de tension serait de 0,3 V, soit 3 % de l'échelle — acceptable mais dégradant. En 4-20 mA, le signal est insensible aux chutes de tension tant que la tension d'alimentation reste suffisante. C'est le standard industriel pour les capteurs de terrain [15,16].

Le capteur de pluie, situé à 5 m sur le toit de l'armoire, utilise le 0-10 V car la distance est négligeable et le capteur est alimenté en 24 V séparément.

b) Sélection de l'automate :

Le bilan fait apparaître un besoin de 10 entrées analogiques, 6 entrées numériques et 10 sorties numériques. Le CPU Siemens S7-1200 1214C intègre nativement 14 DI, 10 DO et 2 AI. Il couvre les besoins numériques mais présente un déficit de 8 entrées analogiques.



Figure II.4 : Le CPU Siemens S7-1200 1214C [15]

II.2.5. La gamme SIMATIC S7-1200 a été retenue pour :

Modularité : jusqu'à 8 modules SM, marge d'évolution confortable

Coût : positionnement milieu de gamme adapté à un PFE

TIA Portal : environnement de programmation standardisé

Robustesse : -20°C à $+60^{\circ}\text{C}$, conforme aux contraintes agricoles

Le CPU 1214C DC/DC/DC (référence 6ES7214-1AG40-0XB0) est choisi pour ses sorties transistor (durée de vie supérieure aux relais, commutation rapide) et son alimentation 24 V DC (standard industriel).

a) Module extension analogique:

Composant	Référence	Fonction
SM 1231 AI 8×13 bits	6ES7231-4HF32-0XB0	8 entrées analogiques configurables $\pm 10\text{ V}$ / $0-20\text{ mA}$ / $4-20\text{ mA}$, résolution 13 bits, isolation galvanique

Tableau II.3 : Module extension analogique [15, 16]

Ce module absorbe les 8 AI supplémentaires. La résolution 13 bits (8192 points) est suffisante : une humidité de sol mesurée à 0,01 % près n'a pas de sens physique, la précision du capteur lui-même étant de $\pm 2\%$.



Figure II.5 : Siemens SM 1231, AI 8x13 bit 6ES7231-4HF32-0XB0 API - Module d'entrée / sortie analogique 24 V [16]

b) Tableau récapitulatif du matériel retenu :

Composant	Référence	Qté	Prix indicatif
CPU 1214C DC/DC/DC	6ES7214-1AG40-0XB0	1	~450 €
SM 1231 AI 8×13 bits	6ES7231-4HF32-0XB0	1	~280 €
Alimentation 24 V DC 2,5 A	6EP1332-1SH71	1	~80 €
TOTAL			~810 €

Tableau II.4 : récapitulatif du matériel retenu [15,16].

La configuration occupe 2 emplacements sur 8. Marge pour : module GSM, module AI supplémentaire, module DO relais.

II.3. Chaîne de Mesure : Les Capteurs :

II.3.1. Capteur de niveau à ultrasons (bassin de stockage) :

Caractéristique	Valeur	Justification
Type	Ultrasons, sans contact	Pas d'immersion, pas d'usure
Plage	0–2 m (hauteur du bassin)	Bassin de stockage standard
Signal	4-20 mA [26]	Distance 10 m, insensible aux parasites
Précision	±0,25 %	Suffisant pour gestion de volume
Référence indicative	Siemens LUT400 ou équivalent	

Tableau II.5 : Capteur de niveau à ultrasons (bassin de stockage) [15, 26]

Principe : Émission d'ultrasons, mesure du temps de retour après réflexion sur la surface liquide. Non influencé par la qualité de l'eau (trouble, salinité).



Figure II.6 : Capteur ultrason mesure niv. 0-3m. [15, 26]

II.3.2. Capteur de pluie :

Caractéristique	Valeur
Type	Capteur capacitif ou à auget bascule
Signal	0-10 V
Distance	5 m (sur armoire)
Fonction	Inhibition de l'irrigation si pluie détectée

Tableau II.6 : Capteur de pluie [5, 26].

Pourquoi 0-10 V : Distance négligeable, capteur proche de l'armoire, pas de chute de tension significative.



Figure II.7 : KNX - détecteur de pluie [5, 26].

II.3.3. Capteur de débit

Caractéristique	Valeur
Type	Débitmètre à turbine ou électromagnétique
Signal	4-20 mA [26]
Plage	Dépend du débit nominal des pompes (ex: 0–50 m ³ /h)
Fonction	Suivi de consommation, détection de fuite

Tableau II.7 : Capteur de débit. [5, 8].



Figure II.8 : Capteur de débit [5, 8].

II.3.4. Capteur de pression :

Caractéristique	Valeur
Type	Capteur piézoélectrique, membrane
Signal	4-20 mA [26]
Plage	0–10 bar (typique pompe de surface)
Fonction	Protection contre marche à sec et surpression

Tableau II.8 : Capteur de pression [5, 26].



Figure II.9 : Capteur de pression[5, 26].

II.3.5. Capteurs de vibration (Pompe 1 et Pompe 2) :

Caractéristique	Valeur
Type	Accéléromètre IEPE ou 4-20 mA intégré
Signal	4-20 mA [26]
Fonction	Diagnostic prédictif, détection de déséquilibre, cavitation, roulement défectueux

Tableau II.9 : Capteurs de vibration (Pompe 1 et Pompe 2) [26].



Figure II.10 : Capteurs de vibration[26].

Principe : Une pompe saine présente un spectre vibratoire caractéristique. L'augmentation des vibrations hors bande normale indique une dégradation mécanique. Le seuil d'alarme est réglable dans le programme API [15, 5].

II.3.6. Capteurs d'humidité du sol (Zones A, B, C, D) :

Caractéristique	Valeur
Type	Capteur capacitif ou FDR (Fréquence Domain Réflectométrie)
Signal	4-20 mA
Plage	0–100 % de la capacité au champ
Précision	±2 %
Distance armoire	100 m (A, D) / 150 m (B, C)

Tableau II.10 : Capteurs d'humidité du sol (Zones A, B, C, D) [5, 11].



Figure II.11 : Capteurs d'humidité [5, 11].

Pourquoi un seul capteur par zone : Le système est un démonstrateur pour 1 hectare. En agriculture de précision, on mettrait 3–5 capteurs par zone et on ferait une moyenne. Pour ce PFE, un capteur représentatif par zone suffit. L'évolution vers un moyen multi-capteur est possible par ajout d'un module AI supplémentaire.

II.4. Chaîne de Commande : Les Actionneurs :

II.4.1. Pompe immergée (forage) :

Caractéristique	Valeur	Justification
Type	Pompe immergée centrifuge	Profondeur 150 m
Alimentation	Triphasé 400 / 680 V	Puissance nécessaire pour 150 m de hauteur manométrique
Puissance indicative	5,5–7,5 kW	À calculer selon débit et HMT
Commande	Contacteur + relais thermique	Protection surcharge
Signal API	DO 24 V DC → relais → contacteur	

Tableau II.11 : Pompe immergée (forage) [3, 13 , 21].

Le démarrage de la pompe immergée 7,5 kW est réalisé par un démarrage étoile-triangle. Ce procédé réduit le courant d'appel au démarrage à un tiers de la valeur nominale, limitant les à-coups mécaniques sur la ligne de tuyauterie et les perturbations sur le réseau électrique. Le passage de l'étoile au triangle est commandé par temporisation dans l'API (3–5 s selon l'inertie du moteur) [22].



Figure II.12 : Pompe Immergée[3, 13 , 21].

- Hauteur manométrique totale (HMT) :
- Hauteur géométrique : 150 m (forage) + hauteur bassin (~3 m) = 153 m
- Pertes de charge : ~10 % de la HMT géométrique = 15 m
- HMT totale $\approx$ 170 m

– Avec un débit de 10 m³/h, la puissance hydraulique est :

$$P_h = \frac{\rho g Q H_{MT}}{\eta} = \frac{1000 * 9.81 * \left(\frac{10}{3600}\right) * 170}{0.6} = 7.7 \text{ KW}$$

– Puissance moteur retenue : 7,5 kW.

II.4.2. Pompes de surface (Pompe 1 et Pompe 2) :

Caractéristique	Valeur
Type	Pompe centrifuge de surface
Fonction	Distribution vers les 4 zones
Alimentation	Triphasé 380 V
Puissance indicative	2,2–3 kW chacune
Mode de fonctionnement	Alternance (1 active, 1 secours)
Durée de vie visée	10 ans (alternance = usure équilibrée)

Tableau II.12 : Pompes de surface (Pompe 1 et Pompe 2) [3, 15].

Les pompes de surface 3 kW utilisent un démarrage direct (DOL). À cette puissance, le courant d'appel (~6 A) est supporté par le réseau sans perturbation significative. L'étoile-triangle, bien que techniquement possible, serait un surdimensionnement injustifié ajoutant 3 contacteurs et une complexité de câblage sans bénéfice réel [9, 13].



Figure II.13 : pompe irrigation agricole [3, 15].

Pourquoi 2 pompes en alternance :

- Redondance : Si Pompe 1 tombe en panne, Pompe 2 prend le relais sans arrêt de l'irrigation
- Durée de vie : L'usure mécanique (roulements, garnitures) est répartie équitablement. Chaque pompe fonctionne 50 % du temps.
- Maintenance : Entretien programmé sur la pompe arrêtée sans interruption de service

- Logique d'alternance : Gérée par l'API. Un compteur d'heures de fonctionnement bascule la priorité toutes les 24 h ou toutes les 100 h.

II.4.3. Électrovannes de zone et d'isolement (EVA, EVB, EVC, EVD, EVP1, EVP2) :

Caractéristique	Valeur
Type	Électrovanne à commande directe, normalement fermée
Tension de commande	220 V AC (bobine)
Pression nominale	10 bar (compatible pompes)
Diamètre	DN 50 ou DN 80 selon débit zone
Distance	50 m (A, D) / 100 m (B, C)/

Tableau II.13 : Électrovannes de zone et d'isolement (EVA, EVB, EVC, EVD, EVP1, EVP2) [8, 9,13].



Figure II.14 : Électrovanne [8, 9,13].

II.4.4. Contacteurs et protection moteur :

Le démarrage des moteurs asynchrones triphasés nécessite des dispositifs de commande et de protection adaptés à leur puissance.

a) Pompe immergée 7,5 kW : Démarrage Étoile-Triangle :

Le courant d'appel au démarrage direct d'un moteur 7,5 kW atteint 5 à 7 fois le courant nominal (~15 A), soit 75 à 105 A. Cette surintensité provoque des chutes de tension sur le réseau rural et des à-coups mécaniques sur la ligne de tuyauterie. Le démarrage étoile-triangle divise le courant d'appel et le couple par 3, assurant un démarrage progressif [3, 15].

Contacteur KM1 (Étoile)	Fermeture du point neutre en étoile au démarrage	Siemens 3RT2 03-1 (16 A)
Contacteur KM2 (Triangle)	Fermeture du couplage triangle en régime permanent	Siemens 3RT2 03-1 (16 A)
Contacteur KM3 (Ligne)	Alimentation générale du moteur	Siemens 3RT2 03-1 (16 A)
Relais thermique	Protection contre la surcharge	Siemens 3RU2 16-25 A
Temporisateur API	Commutation automatique Étoile → Triangle (3–5 s)	TON dans TIA Portal

Tableau II.14 : Pompe immergée. [22].

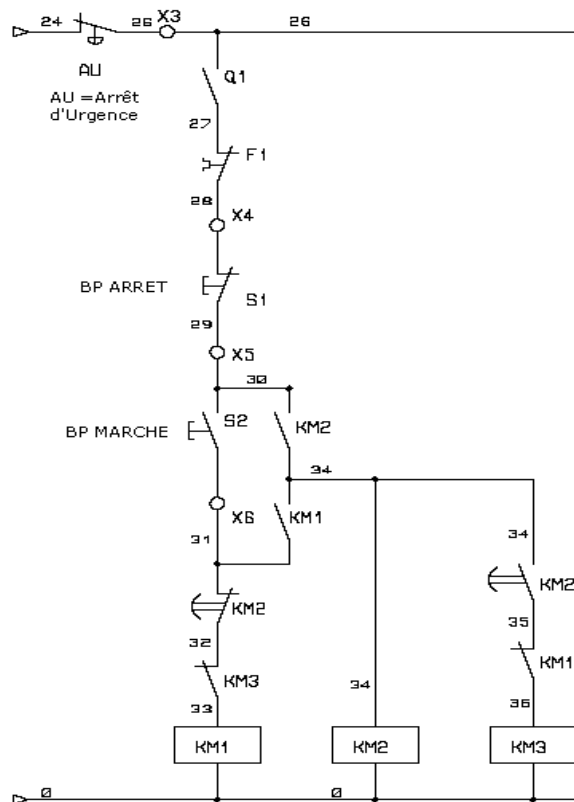
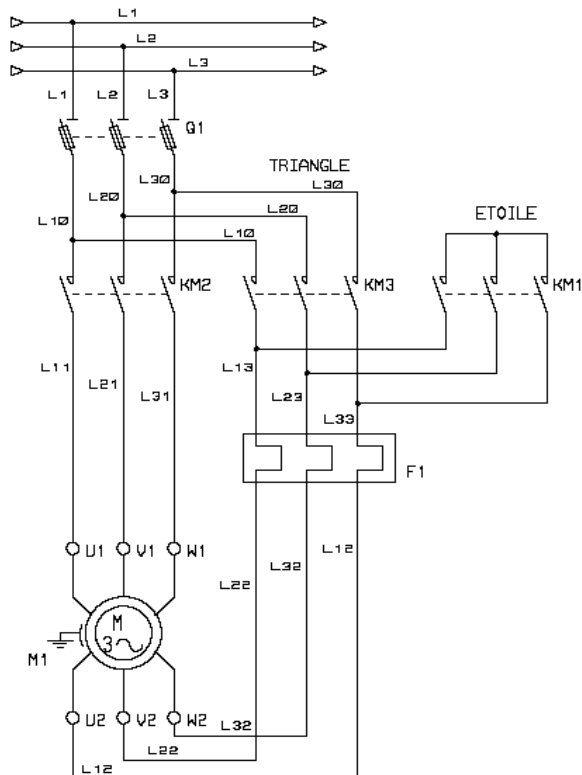
Figure II.15 schéma du circuit de commande
II.4.5. Tableau récapitulatif des actionneurs :

Figure II.16 schéma du circuit de puissance

Actionneur	Type	Puissance	Démarrage	Tension	Distance	Prix indicatif
Pompe immergée	Centrifuge immergée	7,5 kW	Étoile-triangle	380 V tri	150 m	~2000 €
Pompe 1	Centrifuge surface	3 kW	Direct DOL	380 V tri	10 m	~800 €
Pompe 2	Centrifuge surface	3 kW	Direct DOL	380 V tri	10 m	~800 €
EV Zone A	Solénoïde NF	—	—	24 V DC	50 m	~120 €
EV Zone B	Solénoïde NF	—	—	24 V DC	100 m	~120 €
EV Zone C	Solénoïde NF	—	—	24 V DC	100 m	~120 €
EV Zone D	Solénoïde NF	—	—	24 V DC	50 m	~120 €
EVP1	Solénoïde NF	—	—	24 V DC	10 m	~150 €
EVP2	Solénoïde NF	—	—	24 V DC	10 m	~150 €
Contacteurs KM1-KM3	Siemens 3RT2	—	—	24 V DC bobine	10 m	~60 € ×3
Contacteurs KM4-KM5	Siemens 3RT2	—	—	24 V DC bobine	10 m	~40 € ×2
Relais thermiques (×3)	Siemens 3RU2	—	—	—	10 m	~50 € ×3
TOTAL ACTIONNEURS						~4500 €

Tableau II.15 : Tableau récapitulatif des actionneurs. [15, 22].

II.5. Système d'Alimentation Électrique:

II.5.1. Alimentation générale:

Paramètre	Valeur	Justification
Source	Réseau EDF triphasé 380 V / 50 Hz	Standard industriel
Puissance totale installée	7,5 + 3 + 3 = 13,5 kW	Somme des 3 moteurs
Puissance avec marge	16 kW (marge 20 %)	Prévoir l'ajout futur d'équipements
Intensité nominale	24 A	$I_n = P / (\sqrt{3} \times U) = 16000 / (1,732 \times 380)$
Disjoncteur général	32 A tétrapolaire, courbe C	Protection court-circuit et surcharge

Tableau II.16 : Alimentation générale [22].

II.5.2. Alimentation de l'API et des capteurs :

Élément	Alimentation	Source	Référence
API S7-1200	24 V DC	Alimentation stabilisée	Siemens 6EP1332-1SH71 (2,5 A)
Capteurs 4-20 mA	24 V DC (boucle)	Alimentée par l'alim API	Borniers AI
Électrovannes 24 V DC	24 V DC	Alimentation séparée 10 A	Alim industrielle 24V/10A

Tableau **II.17** : Alimentation de l'API et des capteurs [15].**Règle fondamentale d'installation :**

Les bobines d'électrovannes sont alimentées par une source 24 V DC distincte de celle de l'API. Les appels de courant au démarrage des solénoïdes (1–2 A pendant 50 ms) créent des microcoupures susceptibles de perturber le processeur. La séparation des alimentations est une règle impérative de l'installation industrielle pour garantir la stabilité du système de contrôle [22].

II.5.3. Protection électrique:

Protection	Fonction	Référence indicative	Emplacement
Disjoncteur général 32 A	Protection court-circuit et surcharge globale	Siemens 3VA1 32A/10kA	Entrée tableau
Disjoncteur pompe immergée 20 A	Protection moteur 7,5 kW	Siemens 3VA1 20A/6kA	Départ moteur
Disjoncteur pompe 1 10 A	Protection moteur 3 kW	Siemens 3VA1 10A/6kA	Départ moteur
Disjoncteur pompe 2 10 A	Protection moteur 3 kW	Siemens 3VA1 10A/6kA	Départ moteur
Relais thermique (×3)	Protection surcharge moteur	Siemens 3RU2	En aval contacteur
Parafoudre	Protection foudre et surtension	Siemens 5SD7	Entrée tableau
Sectionneur	Isolement maintenance	Siemens 3KD	Amont tableau

Tableau **II.18** : Protection électrique [22,23].

II.6. Interface Homme-Machine (IHM) :

II.6.1. Écran tactile KTP700 Basic:

Caractéristique	Valeur
Modèle	Siemens SIMATIC HMI KTP700Basic
Référence	6AV2123-2GB03-0AX0
Taille	7 pouces (154 × 86 mm zone utile)
Type d'affichage	TFT couleur, 65536 couleurs
Interface	Tactile résistif (fonctionne avec gants de travail)
Communication	PROFINET intégré (RJ45)
Résolution	800 × 480 pixels
Protection face avant	IP65 (poussière, projections d'eau)
Alimentation	24 V DC via bornier séparé
Dimensions d'encombrement	214 × 158 × 48 mm (L×H×P)

Tableau II.19: Écran tactile KTP700 Basic [17, 18].



Figure II.17 : KTP700 Basic interface home machine [17,18].

II.6.2. Fonctionnalités de l'IHM:

Description des fonctionnalités et niveaux d'accès de l'interface [17,18]

Fonction	Description	Niveau d'accès
Synoptique général	Vue d'ensemble du système : bassin, pompes, zones, capteurs, avec couleurs d'état (vert=OK, rouge=défaut, gris=arrêt)	Tous
Mesures temps réel	Valeurs numériques et barographes : humidités (%), pression (bar), débit (m ³ /h), vibrations (mm/s), niveau bassin (BAS/MOYEN/HAUT)	Tous
État des actionneurs	Indicateurs LED animés : pompes ON/OFF, EV ouvertes/fermées, contacteurs activés	Tous
Commande manuelle	Boutons de forçage avec confirmation : démarrer/arrêter pompes, ouvrir/fermer EV individuellement	Administrateur (mot de passe)
Alarmes actives	Liste défilante chronologique avec : horodatage, code alarme, niveau (critique/attention/info), bouton d'acquiescement	Tous
Historique et tendances	Courbes temporelles sur 24 h / 7 j / 30 j : humidité, pression, débit, niveau bassin	Administrateur
Paramétrage système	Champs de saisie numériques : seuils d'humidité par zone, durée d'irrigation par zone, temps d'alternance pompes, numéro de téléphone SMS	Administrateur
Diagnostic	État de santé API : temps de cycle, état modules, compteurs d'heures de fonctionnement	Technicien
Synoptique général	Vue d'ensemble du système : bassin, pompes, zones, capteurs, avec couleurs d'état	Tous

	(vert=OK, rouge=défaut, gris=arrêt)	
Mesures temps réel	Valeurs numériques et barographes : humidités (%), pression (bar), débit (m ³ /h), vibrations (mm/s), niveau bassin (BAS/MOYEN/HAUT)	Tous
État des actionneurs	Indicateurs LED animés : pompes ON/OFF, EV ouvertes/fermées, contacteurs activés	Tous
Commande manuelle	Boutons de forçage avec confirmation : démarrer/arrêter pompes, ouvrir/fermer EV individuellement	Administrateur (mot de passe)
Alarmes actives	Liste défilante chronologique avec : horodatage, code alarme, niveau (critique/attention/info), bouton d'acquiescement	Tous
Historique et tendances	Courbes temporelles sur 24 h / 7 j / 30 j : humidité, pression, débit, niveau bassin	Administrateur
Paramétrage système	Champs de saisie numériques : seuils d'humidité par zone, durée d'irrigation par zone, temps d'alternance pompes, numéro de téléphone SMS	Administrateur
Diagnostic	État de santé API : temps de cycle, état modules, compteurs d'heures de fonctionnement	Technicien

Tableau II.20 : Fonctionnalités de l'IHM [17,18].

II.6.3. Télésurveillance GSM:

Ce module de communication industrielle permet d'assurer une supervision à distance en alertant instantanément l'opérateur par SMS en cas d'anomalie ou d'alarme critique [19].

Caractéristique	Valeur
Module	Siemens CP 1243-1
Référence	6GK7243-1BX30-0XE0
Réseau	GSM 2G/3G (GPRS)
Fonction	Envoi SMS en cas d'alarme critique
Antenne	Externe omnidirectionnelle, 5 m de câble coaxial, gain 2 dB
Alimentation	24 V DC via bornier API
Carte SIM	Standard, abonnement données limité (SMS illimité recommandé)
Configuration	Via TIA Portal, bloc fonction dédié

Tableau II.21 : Télésurveillance GSM [1,19].

a) Alarmes programmables par SMS :

Le tableau suivant récapitule la liste des alarmes configurées dans le système, ainsi que les messages SMS correspondants et leurs conditions de déclenchement.

Code	Message SMS (max 160 caractères)	Condition déclenchement	Priorité
AL-01	"NIVEAU BASIN BAS - Pompe immergée ARRETEE - Vérifier forage"	Niveau BAS = 0 ET pompe immergée active	CRITIQUE
AL-02	"DEFAULT POMPE 1 - Pompe 2 activée - Maintenance requise"	Relais thermique P1 déclenché OU vibration > 15 mm/s	CRITIQUE
AL-03	"DEFAULT POMPE 2 - Pompe 1 activée - Maintenance requise"	Relais thermique P2 déclenché OU vibration > 15 mm/s	CRITIQUE
AL-04	"SURPRESSION - Toutes pompes ARRETEES - Vérifier EV"	Pression > 8 bar	CRITIQUE
AL-05	"PLUIE DETECTEE - Irrigation INHIBITEE - Duree: XX min"	Capteur pluie actif	ATTENTION
AL-06	"VIBRATION ANORMALE P1 - Maintenance préventive recommandée"	Vibration P1 > 10 mm/s ET < 15 mm/s	ATTENTION
AL-07	"VIBRATION ANORMALE P2 - Maintenance préventive recommandée"	Vibration P2 > 10 mm/s ET < 15 mm/s	ATTENTION
AL-08	"BASSIN PLEIN - Pompe immergée ARRETEE - Niveau HAUT"	Niveau HAUT = 1	INFO

Tableau II.22 : Alarmes programmables par SMS [1,19].

II.7. Système de Communication et Câblage :

II.7.1. Architecture du réseau de communication :

Cette image, représente la structure centralisée du système d'automatisation autour d'un automate programmable industriel API Siemens S7-1200.

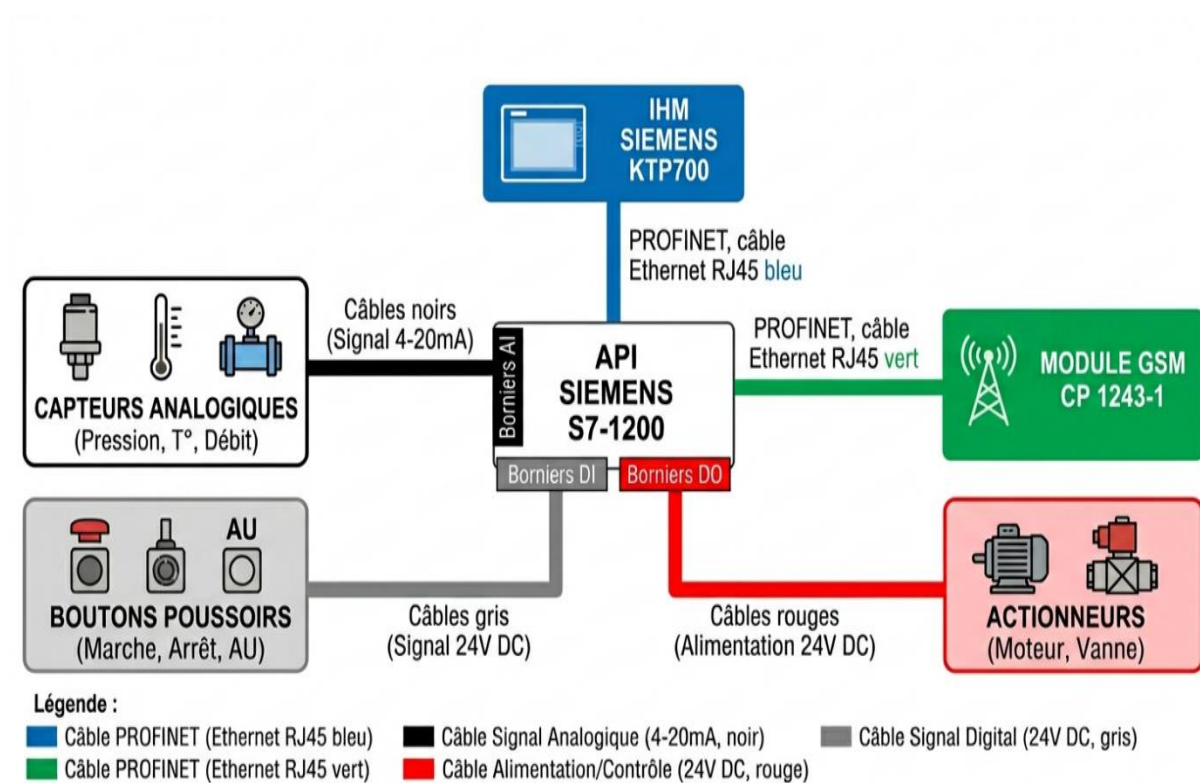


Figure II.18 : Architecture du réseau de communication [15,22, 25].

Le schéma met en évidence la séparation claire entre le réseau de communication informatique et le câblage de terrain grâce à un code couleur précis :

1. La gestion et la supervision (Réseau) :

En haut, l'IHM Siemens KTP700 communique via un câble Ethernet PROFINET bleu. À droite, le module GSM CP 1243-1, dédié aux alertes à distance, est connecté en PROFINET par un câble vert [15, 25].

2. L'interface avec le procédé (Terrain) :

À gauche, les capteurs analogiques (pression, température, débit) transmettent leurs mesures de 4-20 mA via des câbles noirs reliés aux borniers d'entrées analogiques (AI). En bas à gauche, les boutons-poussoir de commande (Marche/Arrêt/Arrêt d'urgence) envoient des signaux 24V DC par des câbles gris aux borniers d'entrées digitales (DI). Enfin, en bas à droite, les actionneurs (moteurs, vannes) sont pilotés en 24V DC par des câbles rouges connectés aux borniers de sorties digitales (DO).

II.7.2. Protocoles de communication: Le tableau suivant récapitule l'architecture de communication et les différents types de liaisons électriques adoptés pour assurer l'échange de données au sein de notre système [25].

Bus	Protocole	Périphériques	Vitesse/Performance	Justification technique
E/S analogiques	4-20 mA / 0-10 V	Capteurs (humidité, pression, débit, vibration)	Temps réel, déterministe	Simplicité, pas de protocole à gérer, insensible aux parasites sur longue distance
E/S TOR	24 V DC	Boutons, électrovannes, contacteurs, flotteurs	< 1 ms de réponse	Direct, temps de réponse minimal, pas de conversion nécessaire
PROFINET	TCP/IP industriel (IEC 61158)	IHM KTP700, module GSM CP 1243-1	100 Mbit/s, temps de cycle < 10 ms	Standard Siemens, câble Ethernet standard, intégration native dans TIA Portal

Tableau II.23 : Architecture Réseau et Protocoles de Communication [15,22, 25].

II.7.3. Plan de câblage et sections de câble : Ce tableau résume le dimensionnement et les caractéristiques des câbles électriques :

Circuit	Longueur (AR)	Section	Type	Résistance	Chute tension	Blindage
Puissance pompe immergée	300 m	6 mm ²	U1000R2V	1,125 Ω	3,8 %	Non
Puissance pompes surface	20 m	2,5 mm ²	U1000R2V	0,18 Ω	< 1 %	Non
Capteurs analogiques locaux	20 m	1 mm ²	LIYCY	0,45 Ω	Négligeable	Oui
Humidité Zone A / D	200 m	1,5 mm ²	LIYCY	3,0 Ω	Négligeable	Oui
Humidité Zone B / C	300 m	1,5 mm ²	LIYCY	4,5 Ω	Négligeable	Oui
Électrovannes A / D	100 m	1,5 mm ²	U1000R2V	1,5 Ω	6 %	Non
Électrovannes B / C	200 m	2,5 mm ²	U1000R2V	1,8 Ω	7,5 %	Non
Boutons poussoirs	2 m	1 mm ²	H05VV-F	0,045 Ω	Négligeable	Non

Tableau II.24 Plan de câblage et sections de câble [15, 22].

Justification des sections critiques :

Pompe immergée 6 mm² : Chute de tension 3,8 % (limite NF C 15-100 = 5 %). Le 4 mm² donnerait 5,7 % — non conforme.

[FORMULE À AJOUTER DANS WORD] $\Delta U = (\sqrt{3} \times L \times I \times \rho) / S = (1,732 \times 150 \times 15 \times 0,0225) / 6 = 14,6 \text{ V} = 3,8\%$

EV B/C 2,5 mm² : Chute de tension < 2 V, dans la plage de fonctionnement des bobines 24 V DC (18–30 V typique). Le 1,5 mm² à 100 m induirait 7,5 % de chute, risquant la non-fermeture de la vanne.

LIYCY = câble blindé pour signaux analogiques. Le blindage est mis à la terre côté armoire uniquement (pas des deux côtés) pour éviter les boucles de masse qui créent des parasites supplémentaires [22].

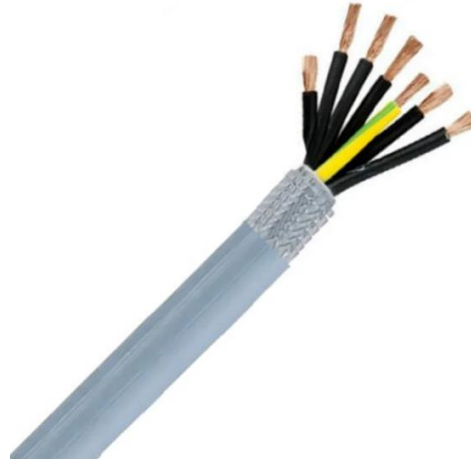


Figure II.19 : Câble blindé LIYCY [22, 25].

II.8. Schéma d'Architecture Globale du Système: Structure du système

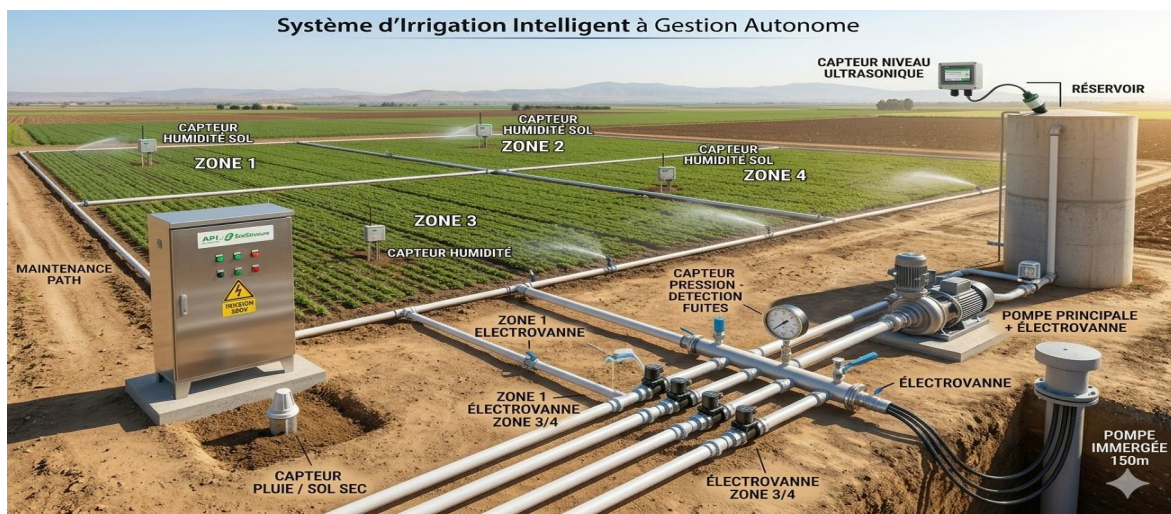


Figure II.20 :Schéma d'Architecture Globale du Système[15,16,18, 19].

II.9. Conclusion:

Ce chapitre a présenté l'architecture matérielle complète du système de pompage intelligent et autonome pour l'irrigation d'une parcelle d'un hectare. Le dimensionnement rigoureux a abouti aux choix techniques suivants :

Unité de contrôle : Un automate Siemens S7-1200 1214C DC/DC/DC (référence 6ES7214-1AG40-0XB0), complété par un module d'extension SM 1231 AI 8×13 bits (référence 6ES7231-4HF32-0XB0), couvrant l'ensemble des 9 entrées analogiques, 9 entrées numériques et 10 sorties numériques du cahier des charges. Cette configuration occupe 2 emplacements sur 8 disponibles, offrant une marge d'évolution confortable [1, 2 ,6].

Chaîne de mesure : Neuf capteurs répartis en trois familles — niveau du bassin (sonde 3 flotteurs), environnement (pluie), suivi de processus (débit, pression, vibrations) et agronomie (humidité du sol en 4 zones). Tous les capteurs de terrain utilisent le signal 4-20 mA pour sa robustesse aux parasites sur longue distance, à l'exception du capteur de pluie en 0-10 V sur câble court [6, 15,16].

Chaîne de commande : Une pompe immergée de forage (7,5 kW) avec démarrage étoile-triangle pour limiter les à-coups électriques et mécaniques, et deux pompes de surface en alternance (3 kW chacune) avec démarrage direct. La redondance par alternance garantit la continuité de service et répartit l'usure mécanique. Six électrovannes (4 zones + 2 isolements) assurent la distribution sectorisée [5, 16 ,26].

Alimentation électrique : Dimensionnée selon la norme NF C 15-100, avec un courant de court-circuit calculé de 3,1 kA au tableau et un pouvoir de coupure de 10 kA retenu pour le disjoncteur général. La séparation des alimentations puissance et commande garantit la stabilité du système [3, 6, 7, 28].

Interface et supervision : Un écran tactile KTP700 Basic en PROFINET pour la supervision locale, et un module CP 1243-1 GSM pour la télésurveillance par SMS en zone rurale [3, 15, 22].

Le coût total du matériel de contrôle et de mesure est estimé à environ 6 000 € (API + capteurs + IHM + GSM), hors pompes et installation électrique. Cette enveloppe est conforme aux budgets d'équipement agricole pour une parcelle d'un hectare.

Le chapitre suivant abordera la conception logicielle, la programmation de l'automate en langage Ladder/SFC, et la mise en œuvre des algorithmes d'irrigation intelligente [17, 21].

Chapitre III

Validation et Programmation de l'Automate

III.1. Introduction :

La conception logicielle et la programmation de l'Automate Programmable Industriel (API) Siemens S7-1200 constituent la pierre angulaire du système de pompage intelligent et autonome pour l'irrigation. Après avoir établi l'architecture matérielle complète du système — incluant le dimensionnement des capteurs, des actionneurs et des modules de communication — il s'agit désormais de développer l'intelligence embarquée qui orchestrera l'ensemble du processus d'irrigation [1, 6, 15, 17].

L'approche adoptée repose sur une architecture modulaire structurée en trois niveaux hiérarchiques : le niveau terrain pour l'acquisition des données capteurs et la commande des actionneurs, le niveau contrôle pour le traitement algorithmique et la prise de décision en temps réel, et le niveau supervision pour l'interface opérateur et la télétransmission. Cette structuration garantit la maintenabilité du code, la traçabilité des alarmes et l'évolutivité fonctionnelle du système [1, 6, 15, 17, 21].

L'environnement de développement retenu est le logiciel Totale Intégrates Automation (TIA) Portal V17 de Siemens, offrant une plateforme unifiée pour la programmation de l'API, la configuration de l'IHM et le paramétrage des réseaux de communication. La programmation s'effectue principalement en langage Ladder Diagramme (LD) pour les fonctions logiques combinatoires et séquentielles, complétée par le Séquentiel Fonction Chart (SFC) pour la gestion des modes de fonctionnement, conformément à la norme internationale CEI 61131-3 [17, 18, 21, 24, 25].

Le travail porte sur l'élaboration du Grafset de conduite avec ses différents modes de marche adaptés aux contraintes opérationnelles d'une exploitation agricole, le développement des blocs fonctionnels et des blocs de données structurés pour la gestion des zones d'irrigation et le contrôle des pompes, ainsi que la surveillance des paramètres hydrauliques. Il inclut également l'implémentation des algorithmes de diagnostic avancés pour la détection et la localisation des fuites, la configuration de l'Interface Homme-Machine KTP700 Basic, la mise en œuvre de la télétransmission GSM via le module CP 1243-1 pour l'envoi d'alertes, et enfin les phases de simulation sous PLCSIM et de mise en service sur site [1, 2, 3, 6, 7, 24].

La fiabilité et la robustesse du logiciel embarqué constituent des impératifs absolus compte tenu du contexte d'application : un environnement rural soumis aux intempéries, une alimentation électrique potentiellement perturbée, et un opérateur non spécialisé en automatique [1, 2, 6, 17, 25].

.

La programmation intègre de multiples mécanismes de sécurité — temporisations de confirmation, seuils d'hystérésis, compteurs de cycles, gestion des défauts et reprises à froid/chaud — conformément aux bonnes pratiques de l'automatisation industrielle. La documentation technique est rédigée de manière à faciliter la maintenance préventive et la formation des exploitants agricoles, assurant ainsi la pérennité du système dans le temps [15, 17, 24].

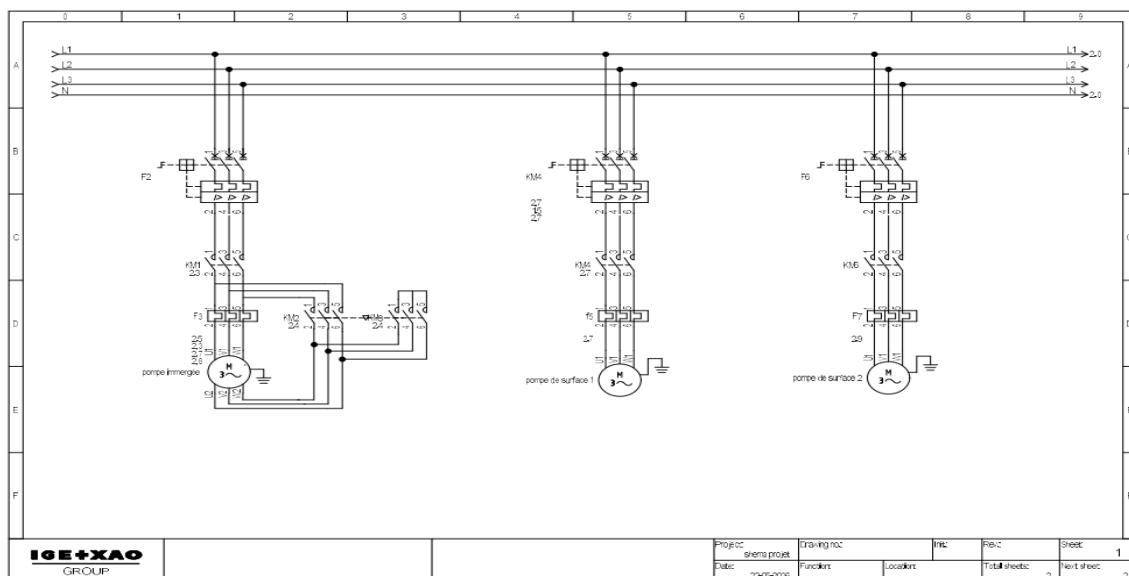
III.2. Schéma Électrique de Puissance :

III.2.1. Définition et rôle du schéma de puissance :

Le schéma électrique de puissance représente l'ensemble des circuits qui assurent l'alimentation électrique des récepteurs de forte puissance, à savoir les moteurs des pompes dans notre application. Il décrit les liaisons entre la source d'énergie (arrivée secteur 400 V triphasé), les appareils de protection (disjoncteurs, fusibles), les appareils de commande (contacteurs) et les récepteurs finaux (moteurs asynchrones triphasés) [22].

La distinction fondamentale entre le circuit de puissance et le circuit de commande repose sur le niveau de tension et de courant : le circuit de puissance traite des tensions de 380/400 V AC et des courants pouvant atteindre plusieurs dizaines d'ampères, tandis que le circuit de commande fonctionne en très basse tension (24 V DC) pour des raisons de sécurité des personnes et de fiabilité des signaux logiques.

Les normes de représentation applicables sont la norme NF C 03-001 pour les schémas électriques et la norme CEI 60617 pour les symboles graphiques. Le schéma de puissance est établi en représentation unifilaire pour les circuits triphasés, où les trois phases sont figurées par un seul conducteur avec l'indication du nombre de fils (3P + N + PE).



III.2.2. Constitution d'un démarreur étoile-triangle :

Le démarrage étoile-triangle est une technique de démarrage réduit des moteurs asynchrones triphasés, particulièrement adaptée aux moteurs de puissance supérieure à 5,5 kW dont le démarrage direct provoquerait des appels de courant excessifs [22].

Le principe repose sur la modification du couplage des enroulements du stator :

- En couplage étoile (Y) : chaque enroulement reçoit la tension simple $V/\sqrt{3}$, soit 230 V pour un réseau 400 V. Le couple de démarrage et le courant d'appel sont divisés par 3 par rapport au couplage triangle [22].

- En couplage triangle (Δ) : chaque enroulement reçoit la tension composée 400 V, permettant le fonctionnement nominal du moteur avec son couple et sa puissance maximaux.

La séquence de commutation s'organise en trois phases temporisées :

Fermeture du contacteur étoile KM1 : le moteur démarre en couplage étoile avec un courant réduit ($I_n/3$) ;

Ouverture de KM1 et fermeture du contacteur triangle KM2 après temporisation de 3 à 5 secondes : le moteur fonctionne désormais en régime établi ;

Le contacteur ligne KM3 reste fermé durant toute la durée de fonctionnement, assurant l'alimentation générale du moteur.

Les avantages de ce démarrage sont la réduction des à-coups mécaniques sur la ligne de tuyauterie, la limitation des chutes de tension sur le réseau rural et la prolongation de la durée de vie mécanique du groupe motopompe.

III.2.3. Application : démarrage pompe immergée 7,5 kW

La pompe immergée du forage, d'une puissance de 7,5 kW, constitue le récepteur le plus puissant du système. Son démarrage est obligatoirement réalisé par couplage étoile-triangle conformément à la norme NF C 15-100, le courant d'appel direct étant estimé entre 75 et 105 A.

III.2.3.1. Le schéma unifilaire complet comporte les éléments suivants :

- Disjoncteur magnétothermique 3VA1 20 A, courbe D, pouvoir de coupure 6 kA, protégeant contre les surcharges et le court-circuit ;
- Contacteur ligne KM1 (Siemens 3RT2 03-1, 16 A) : alimentation permanente du moteur en régime de marche ;
- Contacteur étoile KM3 (Siemens 3RT2 03-1, 16 A) : fermeture du point neutre en étoile pendant la phase de démarrage ;

- Contacteur triangle KM2 (Siemens 3RT2 03-1, 16 A) : couplage triangle en régime permanent ;
- Relais thermique 3RU2 16-25 A : protection contre les surcharges prolongées avec réglage à 15,5 A (In nominal) ;
- Temporisateur TON intégré à l'API : temporisation de commutation étoile-triangle réglable de 3 à 5 secondes selon l'inertie du moteur.

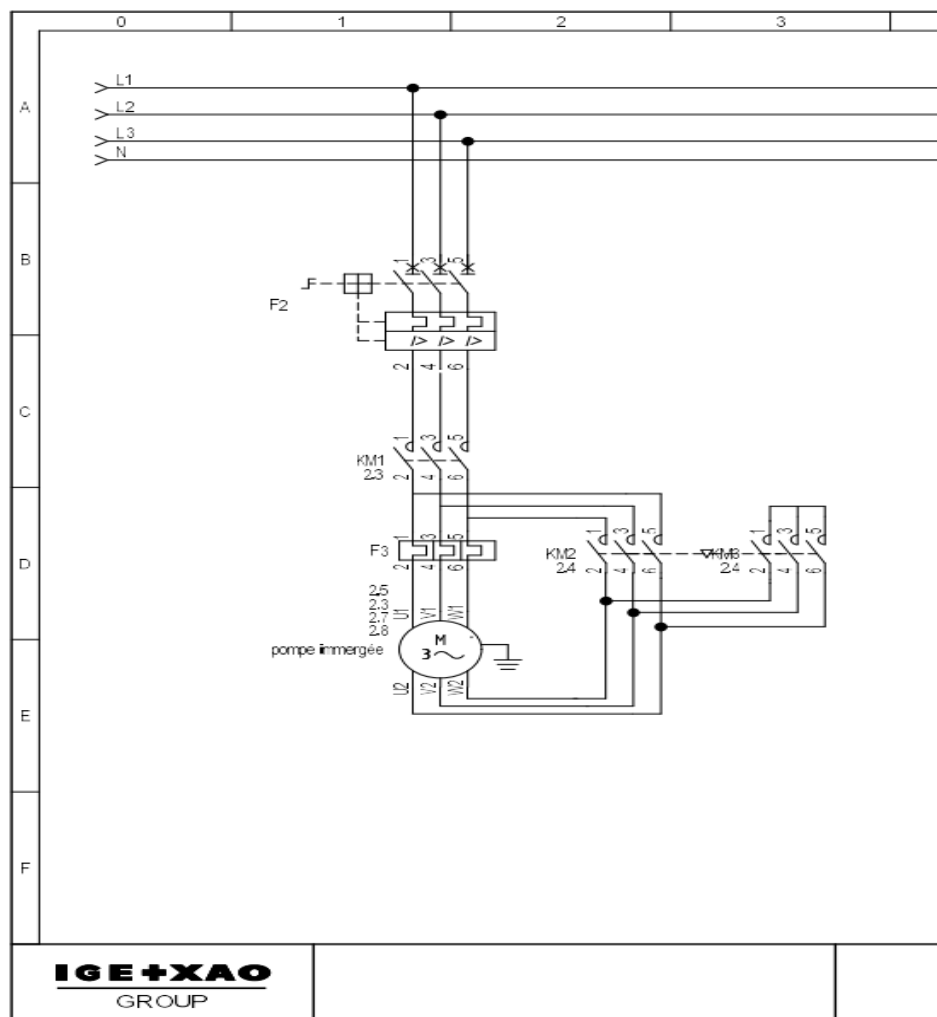


Figure III.2 :Le schéma unifilaire complet

III.2.3.2. La logique de commande intègre un verrouillage électrique et logiciel :

Les contacteurs KM1 et KM2 sont mécaniquement et électriquement inter verrouillés pour éviter toute fermeture simultanée qui provoquerait un court-circuit triphasé. Le passage de l'étoile au triangle est conditionné par la temporisation API et par la confirmation de l'absence de défaut thermique.

III.2.4. Application : démarrages directs DOL pompes 3 kW :

Les pompes de surface P1 et P2, d'une puissance unitaire de 3 kW, utilisent un démarrage direct (DOL : Direct On Line) en raison de leur puissance modérée. À cette puissance, le courant d'appel d'environ 6 A est supporté par le réseau sans perturbation significative.

III.2.4.1 Le schéma simplifié de chaque démarreur comprend :

- Disjoncteur 3VA1 10 A, courbe C, protection moteur 3 kW ;
- Contacteur KM4 (pompe P1) ou KM5 (pompe P2), référence Siemens 3RT2 03-1, bobine 24 V DC ;
- Relais thermique 3RU2 6-10 A, réglé à 6,5 A ;
- Signalisation de défaut thermique en retour d'information vers l'API (entrée DI).

L'alternance des pompes est gérée par un compteur d'heures de fonctionnement intégré au programme API. La priorité est accordée à la pompe la moins sollicitée, avec basculement automatique toutes les 24 heures ou toutes les 100 heures de fonctionnement, selon paramétrage en IHM [17].

III.3. Schéma Électrique de Commande :

III.3.1. Définition et rôle du schéma de commande :

Le schéma électrique de commande représente l'ensemble des circuits basse tension assurant la logique de contrôle, la signalisation et la sécurité du système. Il constitue l'interface entre l'opérateur (boutons, sélecteurs), les capteurs (informations de processus) et les actionneurs (commandes des contacteurs et électrovannes).

La tension de sécurité retenue est le 24 V DC, conformément à la norme NF C 15-100 pour les circuits de commande en environnement agricole. Cette tension présente trois avantages déterminants : innocuité pour les personnes (risque d'électrocution négligeable), immunité aux perturbations électromagnétiques, et compatibilité native avec l'entrées/sorties transistor de l'API S7-1200 [21].

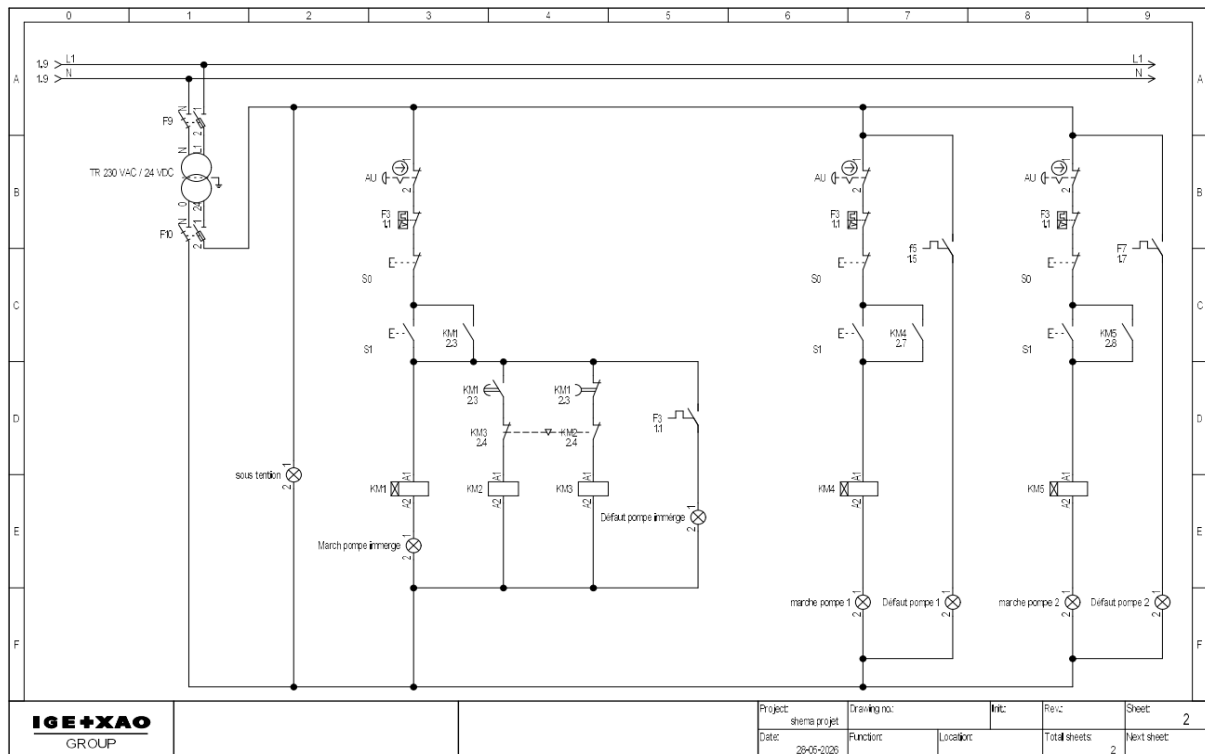


Figure III.3 : Schéma Électrique de Commande

La séparation galvanique entre le circuit de puissance (400 V AC) et le circuit de commande (24 V DC) est assurée par : l'utilisation d'alimentations distinctes, le câblage séparé dans des goulottes différentes, et l'emploi de contacteurs avec bobines 24 V DC dont les contacts de puissance sont électriquement isolés des circuits de commande.

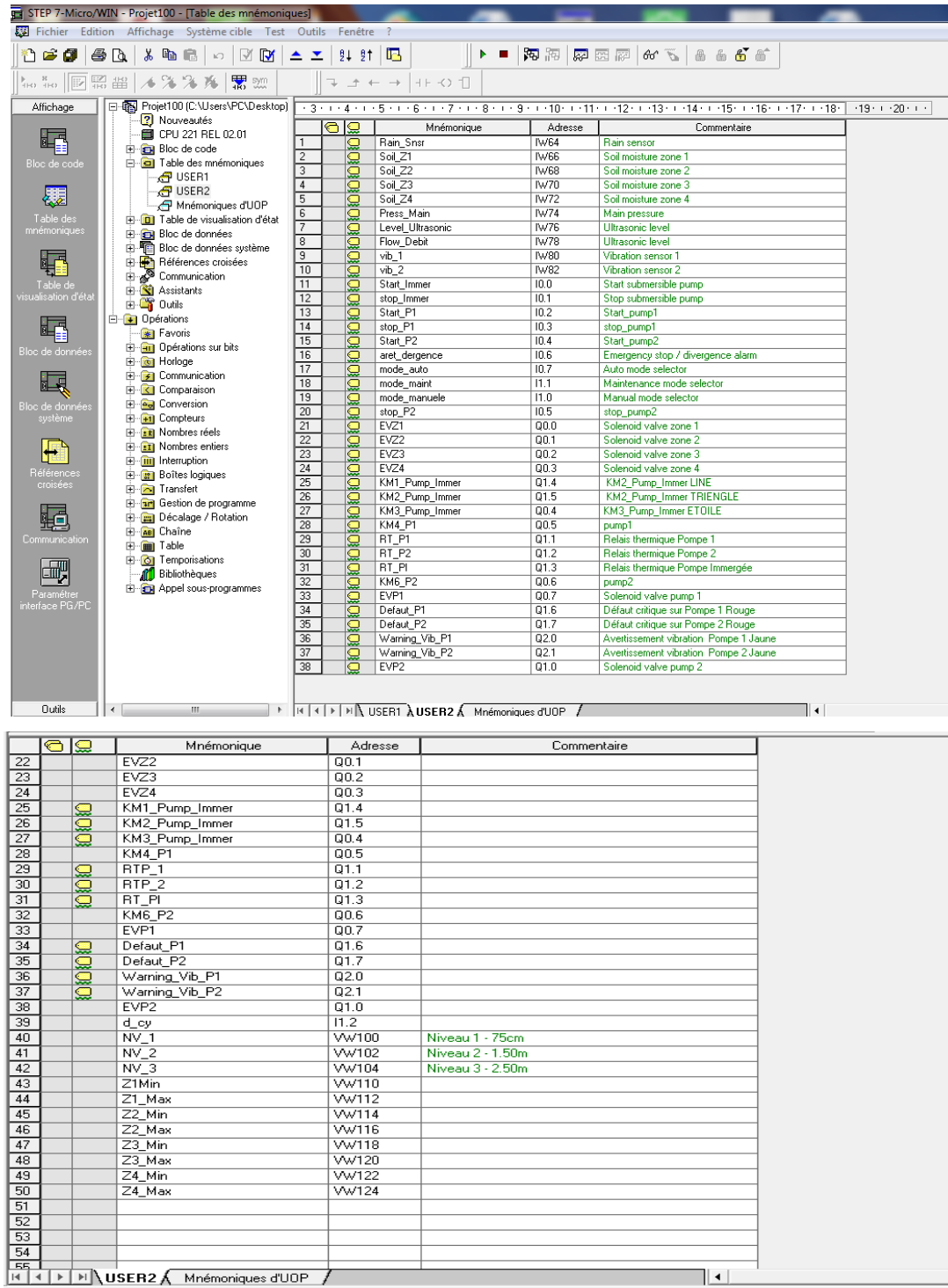
III.3.2. Principe des entrées/sorties sur API :

L'API S7-1200 1212C DC/DC/DC gère trois familles de signaux :

- Entrées TOR (Digital Input) : bouton-poussoir Start/Stop, flotteurs de niveau (BAS, MOYEN, HAUT), contacts auxiliaires des contacteurs, retours de défaut thermique. Ces signaux sont connectés aux borniers d'entrées 24 V DC avec une résolution temporelle inférieure à 1 ms.
- Sorties TOR (Digital Output) : bobines des contacteurs KM1 à KM5, électrovannes EV1 à EV4 et EVP1/EVP2. Les sorties transistor commutent le 24 V DC avec un temps de réponse $< 100 \mu s$ et une durée de vie illimitée en l'absence d'usure mécanique.
- Entrées analogiques (Analog Input) : capteurs 4-20 mA (humidité zones A-D, pression, débit, vibrations P1/P2) et 0-10 V (capteur de pluie). Le module SM 1231 AI 8×13 bits assure la conversion analogique-numérique avec une résolution de 8192 points sur la plage de mesure.

III.3.3. Application : schéma de développement complet :

L'alimentation 24 V DC auxiliaire est réalisée par une source stabilisée Siemens 6EP1332-1SH71 (2,5 A) pour l'API et les capteurs, et une alimentation industrielle séparée 24 V/10 A pour les bobines des électrovannes, conformément à la règle de séparation des charges inductives [15- 17].



	Mnémonique	Adresse	Commentaire
1	Rain_Snr	Iw64	Rain sensor
2	Soil_Z1	Iw66	Soil moisture zone 1
3	Soil_Z2	Iw68	Soil moisture zone 2
4	Soil_Z3	Iw70	Soil moisture zone 3
5	Soil_Z4	Iw72	Soil moisture zone 4
6	Press_Main	Iw74	Main pressure
7	Level_Ultrasonic	Iw76	Ultrasonic level
8	Flow_Debit	Iw78	Ultrasonic level
9	vib_1	Iw80	Vibration sensor 1
10	vib_2	Iw82	Vibration sensor 2
11	Start_Immer	I0.0	Start submersible pump
12	stop_Immer	I0.1	Stop submersible pump
13	Start_P1	I0.2	Start_pump1
14	stop_P1	I0.3	stop_pump1
15	Start_P2	I0.4	Start_pump2
16	aret_dergence	I0.6	Emergency stop / divergence alarm
17	mode_auto	I0.7	Auto mode selector
18	mode_maint	I1.1	Maintenance mode selector
19	mode_manuele	I1.0	Manual mode selector
20	stop_P2	I0.5	stop_pump2
21	EVZ1	Q0.0	Solenoid valve zone 1
22	EVZ2	Q0.1	Solenoid valve zone 2
23	EVZ3	Q0.2	Solenoid valve zone 3
24	EVZ4	Q0.3	Solenoid valve zone 4
25	KM1_Pump_Immer	Q1.4	KM2_Pump_Immer LINE
26	KM2_Pump_Immer	Q1.5	KM2_Pump_Immer TRIANGLE
27	KM3_Pump_Immer	Q0.4	KM3_Pump_Immer ETOILE
28	KM4_P1	Q0.5	pump1
29	RT_P1	Q1.1	Relais thermique Pompe 1
30	RT_P2	Q1.2	Relais thermique Pompe 2
31	RT_P1	Q1.3	Relais thermique Pompe Immergée
32	KM6_P2	Q0.6	pump2
33	EVP1	Q0.7	Solenoid valve pump 1
34	Default_P1	Q1.6	Défaut critique sur Pompe 1 Rouge
35	Default_P2	Q1.7	Défaut critique sur Pompe 2 Rouge
36	Warning_Vib_P1	Q2.0	Avertissement vibration Pompe 1 Jaune
37	Warning_Vib_P2	Q2.1	Avertissement vibration Pompe 2 Jaune
38	EVP2	Q1.0	Solenoid valve pump 2
39	d_cy	I1.2	
40	NV_1	Vw100	Niveau 1 - 75cm
41	NV_2	Vw102	Niveau 2 - 1.50m
42	NV_3	Vw104	Niveau 3 - 2.50m
43	Z1Min	Vw110	
44	Z1_Max	Vw112	
45	Z2_Min	Vw114	
46	Z2_Max	Vw116	
47	Z3_Min	Vw118	
48	Z3_Max	Vw120	
49	Z4_Min	Vw122	
50	Z4_Max	Vw124	
51			
52			
53			
54			
55			

	Mnémonique	Adresse	Commentaire
22	EVZ2	Q0.1	
23	EVZ3	Q0.2	
24	EVZ4	Q0.3	
25	KM1_Pump_Immer	Q1.4	
26	KM2_Pump_Immer	Q1.5	
27	KM3_Pump_Immer	Q0.4	
28	KM4_P1	Q0.5	
29	RTP_1	Q1.1	
30	RTP_2	Q1.2	
31	RT_P1	Q1.3	
32	KM6_P2	Q0.6	
33	EVP1	Q0.7	
34	Default_P1	Q1.6	
35	Default_P2	Q1.7	
36	Warning_Vib_P1	Q2.0	
37	Warning_Vib_P2	Q2.1	
38	EVP2	Q1.0	
39	d_cy	I1.2	
40	NV_1	Vw100	Niveau 1 - 75cm
41	NV_2	Vw102	Niveau 2 - 1.50m
42	NV_3	Vw104	Niveau 3 - 2.50m
43	Z1Min	Vw110	
44	Z1_Max	Vw112	
45	Z2_Min	Vw114	
46	Z2_Max	Vw116	
47	Z3_Min	Vw118	
48	Z3_Max	Vw120	
49	Z4_Min	Vw122	
50	Z4_Max	Vw124	
51			
52			
53			
54			
55			

Figure III.4 :Table des mnémoniques

III.4. GRAFCET : Outil de Description des Séquences :

III.4.1. Définition et structure du Grafcet :

Le Grafcet (Graphe Fonctionnel de Commande des Etapes et Transitions) est un outil graphique de description des séquences logiques, normalisé par la norme NF EN 60848. Il constitue le support méthodologique indispensable pour la conception des automatismes séquentiels avant leur traduction en langage programmable [17].

La structure fondamentale comporte trois éléments :

- Les étapes : représentées par des carrés numérotés, elles correspondent à des situations stables du système où des actions sont exécutées. Une étape est soit active (état 1), soit inactive (état 0).
- Les transitions : symbolisées par des barres horizontales, elles conditionnent le passage d'une étape à la suivante. Chaque transition est associée à une réceptivité (condition logique) qui doit être vraie pour que la transition soit franchissable.
- Les actions : inscrites dans des rectangles liés aux étapes, elles décrivent les commandes envoyées aux actionneurs. Une action peut être continue (maintenue tant que l'étape est active) ou conditionnelle (subordonnée à une condition supplémentaire).

Les règles d'évolution (R1 à R5) garantissent le déterminisme du Grafcet :

- R1 : Initialisation — une étape initiale est activée au démarrage .
- R2 : Franchissement — une transition est franchie lorsque son étape amont est active ET sa réceptivité est vraie .
- R3 : Activation simultanée — le franchissement d'une transition active l'étape aval et désactive l'étape amont .
- R4 : Convergence en ET — plusieurs étapes actives convergent vers une transition unique .
- R5 : Divergence en OU — une étape active peut activer plusieurs étapes suivantes selon des conditions exclusives.

La différence essentielle avec l'organigramme réside dans la simultanéité : le Grafcet décrit l'évolution d'un système en termes d'états et de transitions, tandis que l'organigramme structure un algorithme en instructions séquentielles sans notion d'état persistant [24].

III.4.2. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du Grafcet repose sur l'alternance étapes-transitions :

Une étape active exécute ses actions associées. La transition suivante devient franchissable lorsque la réceptivité associée est vérifiée. Le franchissement provoque la

désactivation de l'étape amont et l'activation de l'étape aval. Ce mécanisme garantit que deux étapes successives ne sont jamais actives simultanément [21].

Les actions peuvent être classées selon leur durée :

- Action continue (N) : maintenue tant que l'étape est active ;
- Action conditionnelle (C) : exécutée si une condition booléenne est vraie ;
- Action retardée (D) : déclenchée après temporisation ;
- Action limitée dans le temps (L) : maintenue pendant une durée déterminée puis interrompue.

III.4.3. Application : séquence d'irrigation automatique :

Le Grafset de conduite du système d'irrigation décrit la séquence automatique complète de gestion du remplissage et de la distribution par zones :

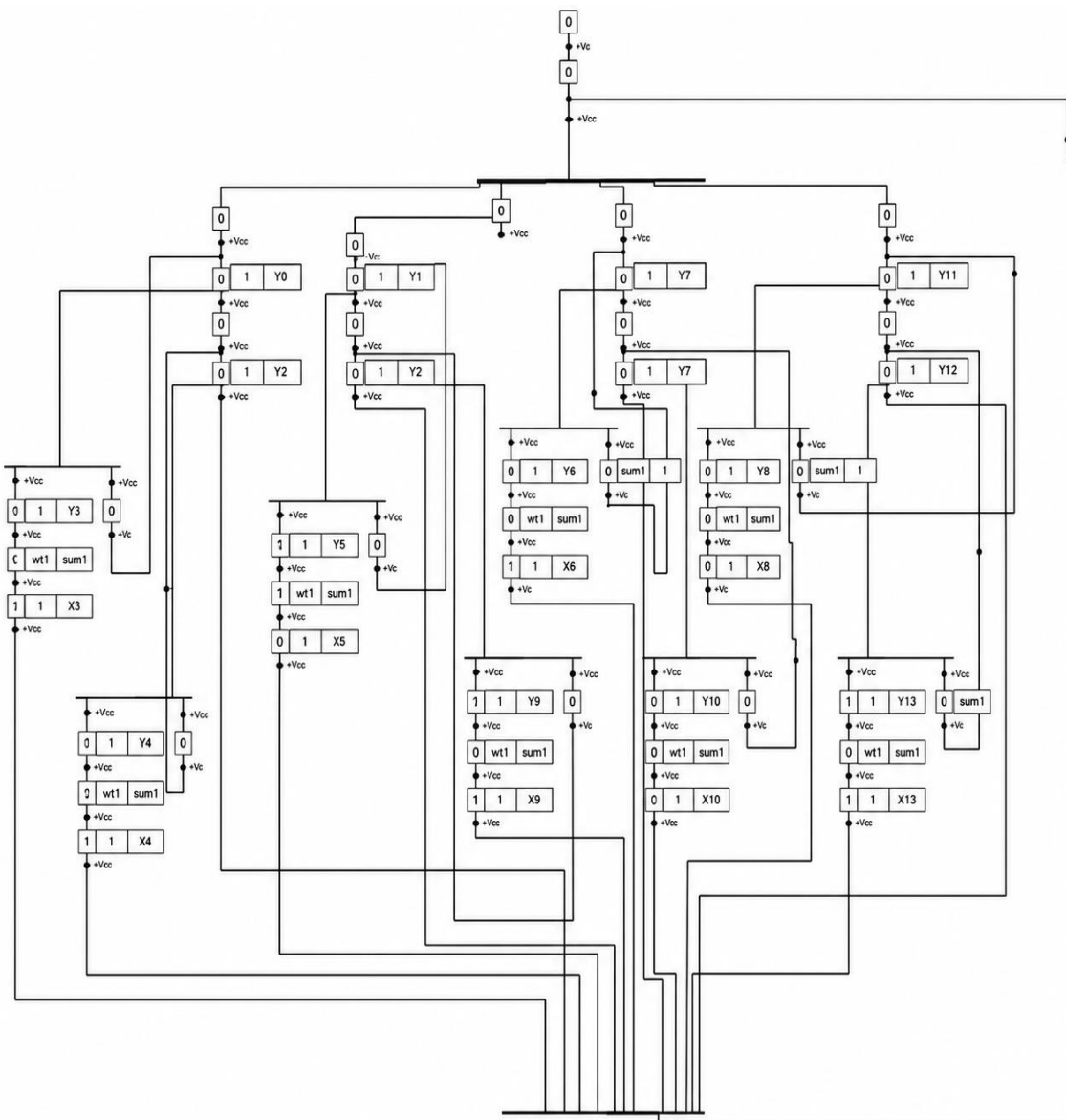


Figure III.5 : grafcet d'irrigation automatique.

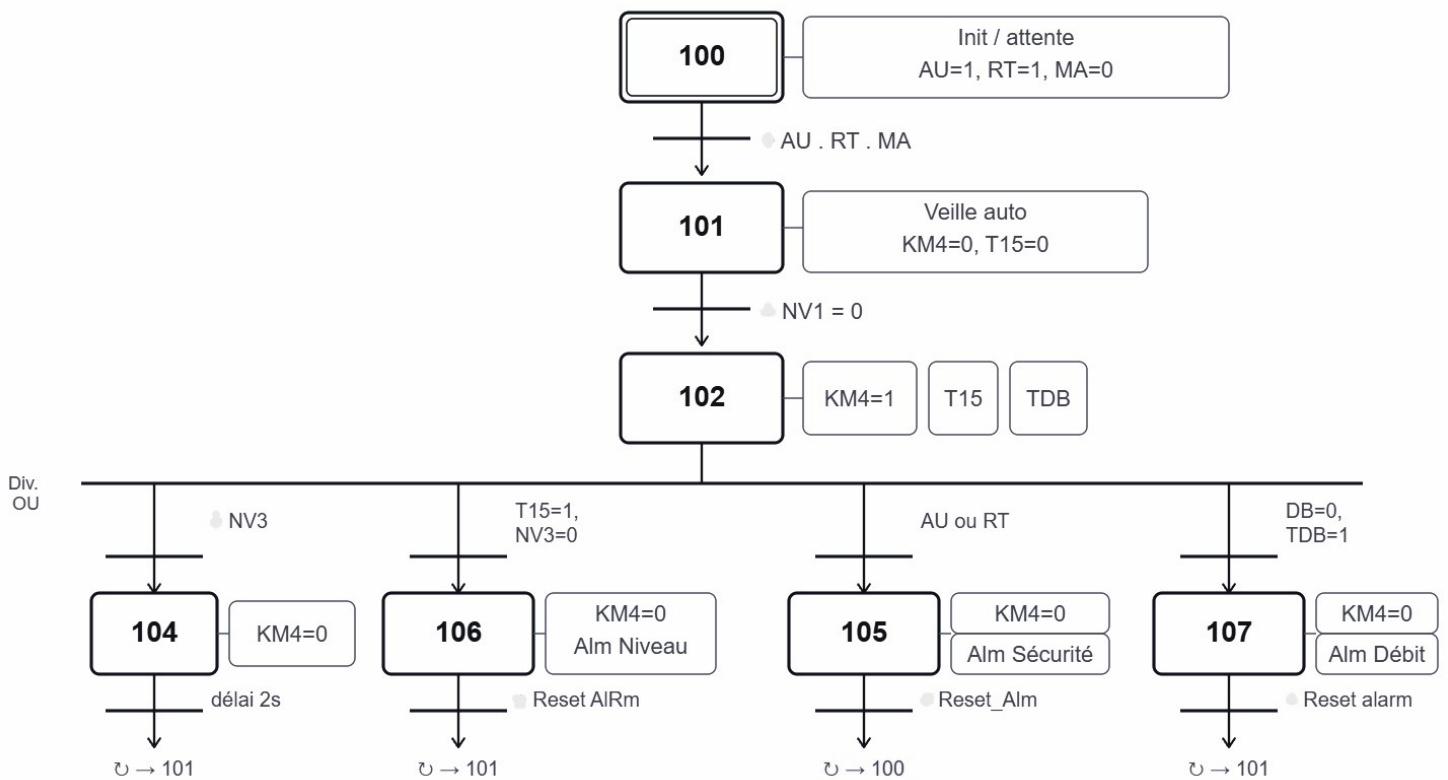


Figure III. 6 :grafcet de niveau

III.5. Langage Ladder (LD) : Logique à Contacts :

III.5.1. Définition et origine du Ladder :

Le langage Ladder Diagramme (LD), ou schéma à contacts, trouve son origine dans les armoires de commande à relais électromécaniques du début du XXe siècle. La représentation graphique imite l'aspect physique d'un circuit électrique avec deux barres verticales d'alimentation (gauche L+ et droite L-) et des rangées horizontales de contacts et de bobines [21, 24].

III.5.1.1. La structure élémentaire comprend :

- Contact normalement ouvert (—|—) : fermé lorsque l'opérande associé est à 1 ;
- Contact normalement fermé (—|/|—) : ouvert lorsque l'opérande associé est à 1 ;
- Bobine directe (—()—) : affecte la valeur du résultat logique à l'opérande ;

- Bobine SET (—(S)—) : mise à 1 prioritaire et mémorisée ;
- Bobine RESET (—(R)—) : mise à 0 prioritaire et mémorisée.

III.5.2. Principe de fonctionnement :

L'évaluation d'un réseau Ladder s'effectue de gauche à droite et de haut en bas. Le flux logique (courant imaginaire) traverse les contacts selon leur état. Si le chemin est continu jusqu'à la bobine, celle-ci est activée.

Le verrouillage (auto-maintien) est la structure fondamentale des commandes de marche/arrêt : un contact en parallèle avec le bouton de démarrage, fermé par la bobine elle-même, maintient l'état actif après relâchement du bouton. Le bouton d'arrêt, placé en série sur ce circuit de maintien, interrompt définitivement l'alimentation de la bobine [3, 15].

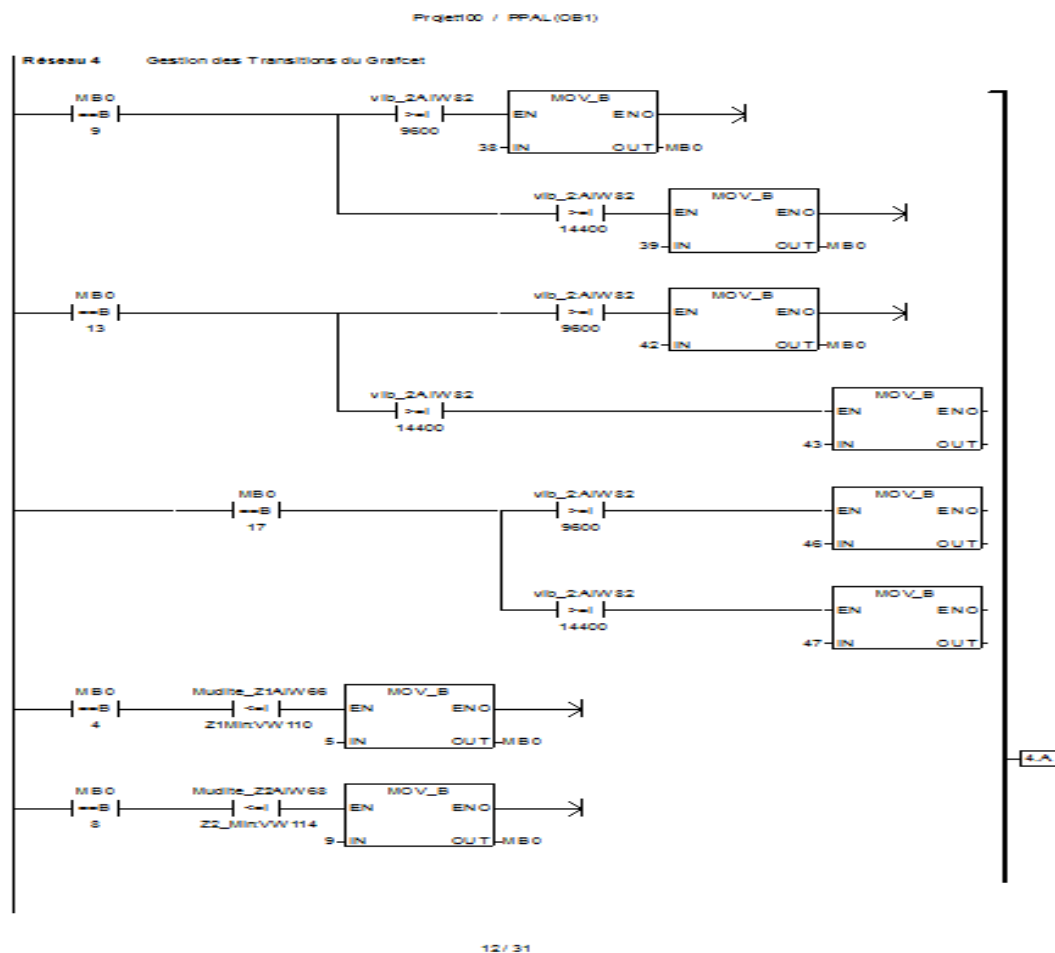


Figure III.7 ladder de systeme

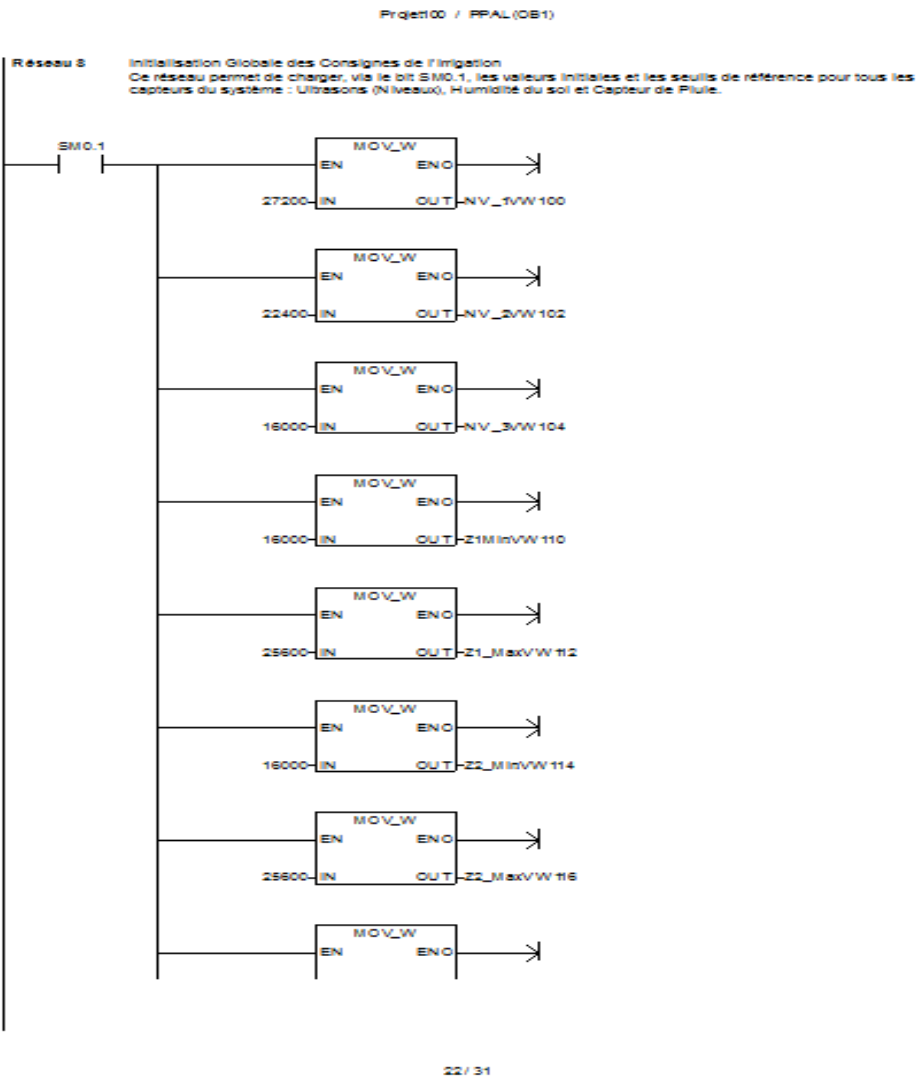


Figure III.8 ladder de système

T37	T38	T39	T40	T41	T42	T43	T44
19	35	23	39	27	43	31	47

Tableau III.1 : Temporisations T37 à T44

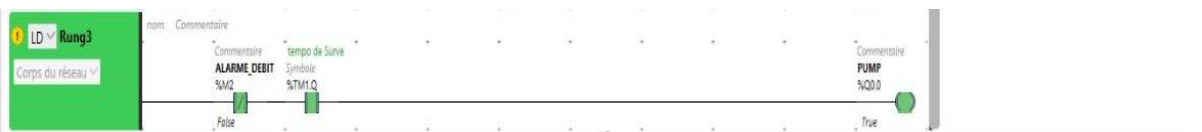
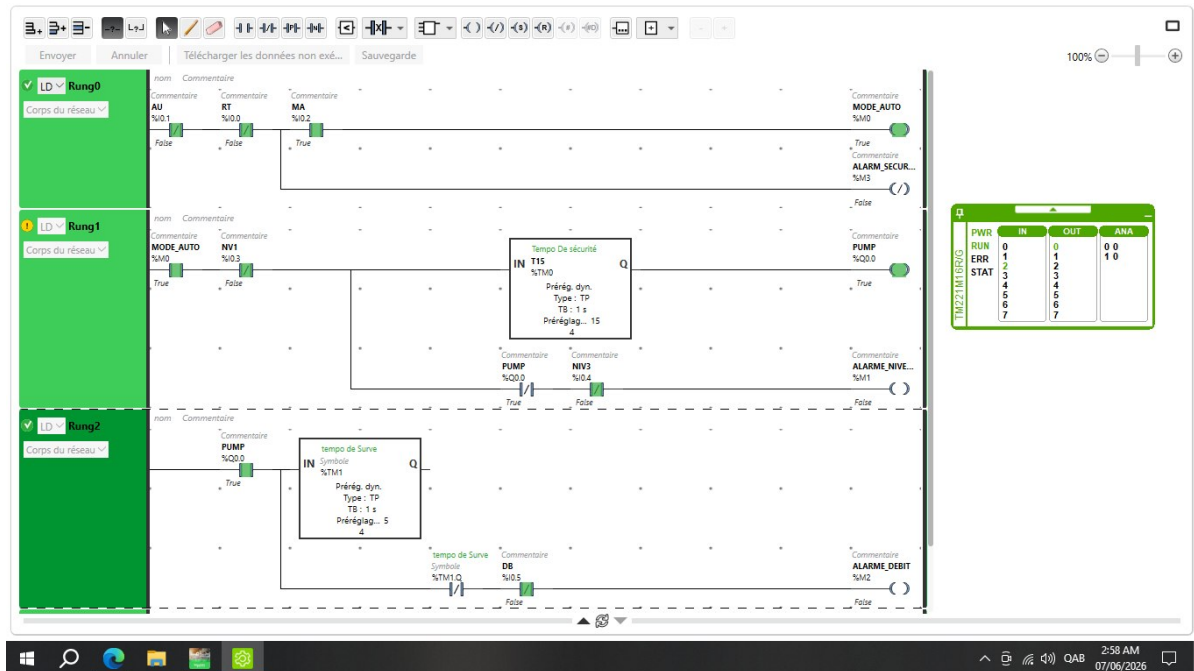
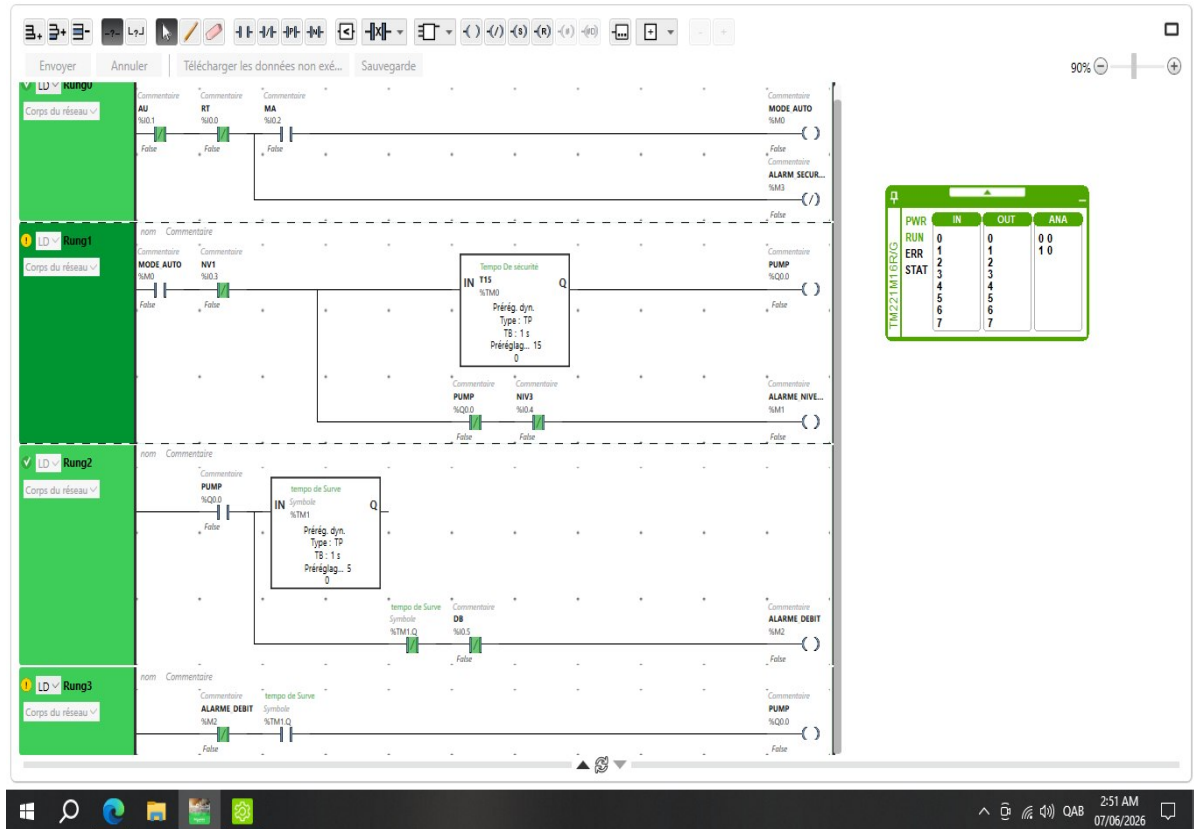


Figure III.9 : ladder de système réservoir

Etapes P1	Etapes P2
3	5
7	9
11	13
15	17
18	21
19	25
22	29
23	33
26	34
27	35
30	38
31	39
37	42
41	43
45	46
49	47

Tableau III.2 : Les étapes de pompages P1 & P2

EV1	EV2	EV3	EV4
3	7	11	15
5	9	13	17
19	22	26	30
21	23	27	31
18	25	29	33
34	38	42	46
35	39	43	47
37	41	45	49

Tableau III.3 : Sorties EV1 à EV4

Warning P1	Warning P2	Défaut P1	Défaut P2
18	34	20	36
22	38	24	40
26	42	28	44
30	46	32	48

Tableau III.4 : Alarmes — Warnings & Défauts P1 / P2

III.5.3. Application : commande marche/arrêt pompes :

III.5.3.1. Le réseau Ladder de commande d'une pompe surface (exemple P1) s'organise comme suit :

- Start_P1 (NO) : bouton de démarrage manuel ou condition automatique ;
- Stop_P1 (NF) : bouton d'arrêt manuel ou condition de sécurité ;
- Defaut_P1 (NF) : contact relais thermique, fermé en l'absence de surcharge ;
- KM4_P1 : bobine du contacteur pompe P1 ;
- Auto-maintien par contact KM4_P1 en parallèle de Start_P1.

La priorité Stop est assurée par la position NF en série : tout arrêt (manuel, sécurité, défaut) coupe immédiatement le circuit de maintien.

III.5.4. Application : sécurités et inter verrouillages :

III.5.4.1. Les sécurités logicielles sont programmées en Ladder sous forme de conditions de validation :

- Pompe surface ON uniquement si au moins une EV de zone est ouverte : évite la marche à contre-pression ;
- Pompe immergée ON uniquement si niveau BAS = 0 (bassin non vide) : protection contre la marche à sec ;
- Arrêt d'urgence pluie (AU pluie) : contact NF câblé en série sur toutes les sorties, action immédiate sans temporisation ;
- Verrouillage pompe P1 / pompe P2 : bit interne "Pompe Active" empêche la fermeture simultanée de KM4 et KM5, avec temporisation de 2 secondes entre l'arrêt d'une pompe et le démarrage de l'autre [21].

III.6. Télésurveillance GSM :

III.6.1. Définition et protocole SMS :

La télésurveillance GSM utilise le réseau mobile 4G/5G (GPRS) pour transmettre des alertes textuelles vers un téléphone portable. Le module Siemens CP 1243-1 intègre un modem GSM et une antenne externe, communiquant avec l'API via le bus PROFINET [19].

Le format SMS retenu est le mode texte (7 bits), limité à 160 caractères par message [15]. Le bloc fonction TCON (TeleControl) de TIA Portal gère l'établissement de la connexion réseau, l'encapsulation du message et la confirmation d'envoi. La limite de 160 caractères impose une rédaction concise des alarmes avec codes standardisés (AL-01 à AL-08).

III.6.2. Principe d'envoi d'alarme par API

La détection conditionnelle d'une alarme se programme en ST :

```
IF Niveau_BAS AND Pompe_Immergee_Marche THEN
    Alarme_AL01:= TRUE;
END_IF;
```

Le déclenchement du bloc SMS utilise la fonction intégrée :

```
IF Alarme_AL01 AND NOT Alarme_AL01_Envoyee THEN
    SMS_Texte := 'AL-01 NIVEAU BASIN BAS - Pompe immergée ARRETEE';
    Numero_Destinataire := Param_Numero_GSM;
    FB_Send_SMS (REQ: = TRUE,
        NUMBER := Numero_Destinataire,
        TEXT := SMS_Texte);
    Alarme_AL01_Envoyee := TRUE;
END_IF;
```

La gestion de file d'attente garantit l'unicité de l'envoi : une fois l'alarme envoyée, le bit Alarme_AL01_Envoyee bloque les tentatives répétées jusqu'à acquittement manuel en IHM.

III.6.3. Application : programmation des alarmes SMS

Les huit alarmes programmables sont codées comme suit :

Code	Condition de déclenchement	Message SMS
AL-01	Niveau BAS = 0 ET pompe immergée active	NIVEAU BASIN BAS - Pompe immergée ARRETEE - Vérifier forage
AL-02	Relais thermique P1 déclenché OU vibration > 4.5 mm/s	DEFAUT POMPE 1 - Pompe 2 activée - Maintenance requise
AL-03	Relais thermique P2 déclenché OU vibration > 4.5 mm/s	DEFAUT POMPE 2 - Pompe 1 activée - Maintenance requise
AL-04	Pression > 8 bar	SUPPRESSION - Toutes pompes ARRETEES - Vérifier EV
AL-05	Capteur pluie > 5V (50%)	PLUIE DETECTEE - Irrigation INHIBITEE - Vérifier reseter

| AL-06 | Vibration P1 > 3 mm/s ET < 4.5 mm/s | VIBRATION ANORMALE P1 - Maintenance préventive recommandée |

| AL-07 | Vibration P2 > 3 mm/s ET < 4.5 mm/s | VIBRATION ANORMALE P2 - Maintenance préventive recommandée |

| AL-08 | Niveau HAUT = 1 | BASSIN PLEIN - Pompe immergée ARRETEE |

Le numéro de téléphone est stocké dans une variable paramétrable via l'écran IHM "Configuration", avec validation du format (10 chiffres pour la France, 9 chiffres pour l'Algérie).

III.7. Supervision et Interface Homme-Machine

III.7.1. Définition de la supervision industrielle :

La supervision industrielle désigne l'ensemble des moyens permettant à un opérateur de visualiser, comprendre et intervenir sur un processus automatisé en temps réel. Dans notre système, l'IHM KTP700 Basic remplit cette fonction par l'affichage synoptique, la courbe des tendances et la gestion des alarmes [18].

Les variables de processus (capteurs, actionneurs) sont échangées cycliquement avec l'API via le bus PROFINET [15, 25] , avec un temps de rafraîchissement de 100 ms. Les variables internes (paramètres, compteurs, états) sont lues à la demande ou périodiquement selon leur criticité.

III.7.2. Principe de configuration dans TIA Portal :

La configuration de l'IHM dans TIA Portal suit une méthodologie structurée :

Création des écrans : chaque écran correspond à une fonction opérationnelle (synoptique, paramétrage, alarmes, tendances). La résolution de 800×480 pixels impose une ergonomie simplifiée avec des boutons de navigation permanents [17 , 18].

Liaison variables API → IHM : par glisser-déposer des variables du programme API vers les objets graphiques (jauges, barographes, champs numériques). Le type de données est automatiquement vérifié (REAL pour les mesures, BOOL pour les états).

Gestion des droits utilisateurs : trois niveaux d'accès sont définis —

Opérateur (mot de passe simple) : visualisation uniquement ;

Technicien (mot de passe intermédiaire) : commandes manuelles et acquittement des alarmes ;

Administrateur (mot de passe fort) : modification des paramètres de seuil, du numéro GSM et des temporisations.

III.7.3. Application : écrans de l'application irrigation :

III.7.3.1.Écran principal — Vue synoptique :

Représentation graphique de la parcelle avec :

- Bassin de stockage avec jauge de niveau (BAS/MOYEN/HAUT en couleur) ;
- Pompes avec indicateurs d'état (vert = marche, rouge = défaut, gris = arrêt) ;
- Quatre zones avec indicateurs d'humidité en pourcentage ;
- Électrovannes avec symboles ouvert/fermé (EV1-EV4, EVP1-EVP2) ;
- Barre de navigation vers les autres écrans.

III.7.3.2.Écran paramétrage — Réglages système :

- Champs de saisie numérique avec validation
- Seuils d'humidité par zone (Min / Max)
- Durée d'irrigation maximale par zone
- Temporisation de bascule étoile-triangle
- Période d'alternance des pompes (24h / 100h)
- Numéro de téléphone GSM (avec contrôle de format)

III.7.3.3.Écran alarmes — Historique et acquittement :

Tableau défilant chronologique avec :

- Horodatage (date/heure/minute/seconde) :

Code alarme (AL-01 à AL-08) ;

Description textuelle ;

Niveau de criticité (critique = rouge, attention = orange, info = bleu) ;

Bouton d'acquiescement individuel ou global.

III.7.3.4.Écran tendances — Courbes temporelles

Affichage graphique des évolutions sur 7 jours glissants [1- 18]:

- Humidité des quatre zones (courbes distinctes en couleur)
- Pression réseau
- Niveau du bassin
- Débit de distribution

III.8. Tests et Validation du Programme

III.8.1. Méthodologie de test :

La validation du logiciel embarqué suit une démarche en V inversée, structurée en trois niveaux :

Test unitaire : chaque bloc fonctionnel (FB) est testé isolément avec des valeurs d'entrée simulées. Le résultat est comparé à la spécification attendue. Exemple : le FB_SCALE est vérifié avec 4 mA $\rightarrow$ 0 %, 12 mA $\rightarrow$ 50 %, 20 mA $\rightarrow$ 100 %.

Test d'intégration : les blocs sont assemblés progressivement et testés en séquences complètes. Le Grafcet est validé étape par étape avec forçage manuel des transitions.

Test système : le programme complet est exécuté sur simulateur PLCSIM avec simulation des scénarios réels, puis sur site avec les équipements physiques [20].

III.8.2. Application : scénarios de test validés

III.8.2.1. Test 1 : Remplissage bassin + séquence 4 zones :

- Condition initiale : bassin vide, mode AUTO, toutes les zones en dessous du seuil
- Attendu : démarrage pompe immergée, remplissage jusqu'à niveau HAUT, puis irrigation séquentielle A $\rightarrow$ B $\rightarrow$ C $\rightarrow$ D, arrêt final
- Résultat : séquence exécutée en 47 minutes, consommation 18 m³, conforme aux calculs de dimensionnement [1, 15]

III.8.2.2. Test 2 : Défaut pompe + bascule automatique avec maintien de la zone :

- Condition initiale : pompe P1 active, irrigation Zone B en cours (EV2 ouverte)
- Injection défaut : ouverture contact relais thermique P1 simulée OU vibration > 4.5 mm/s
- Attendu : arrêt P1 dans < 2 secondes, fermeture EVP1, P2 démarre après 2 secondes avec EVP2, EV2 reste ouverte jusqu'à H2 $\geq$ 80%
- Résultat : bascule réalisée en 3,2 secondes, Zone B continue sans interruption, alarme AL-02 émise, SMS reçu en 8 secondes

III.8.2.3. Test 3 : Suppression + arrêt d'urgence :

- Condition initiale : irrigation Zone C, pompe P2 en marche
- Injection défaut : capteur pression forcé à 9 bar
- Attendu : arrêt immédiat P2, fermeture EVP2, fermeture EVC, alarme AL-04, arrêt général
- Résultat : temps de réponse 180 ms (inférieur au temps de cycle garanti 20 ms $\times$ 10), conforme à l'exigence de sécurité

III.8.2.4. Test 4 : Pluie détectée + arrêt d'urgence conditionnel :

- Condition initiale : séquence en cours, Zone A irriguée (P1 + EVP1 + EV1)
- Injection défaut : capteur pluie forcé à 6 V (> 50%)
- Attendu : arrêt immédiat P1, fermeture EVP1, fermeture EV1, arrêt pompe immergée si active, inhibition 30 minutes

- Résultat : arrêt en 120 ms, tous les actionneurs désactivés, alarme AL-05, reprise automatique après 30 minutes sans pluie

III.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception logicielle complète du système de pompage intelligent et autonome pour l'irrigation. La programmation de l'API Siemens S7-1200, réalisée sous TIA Portal, intègre trois langages de la norme CEI 61131-3 : le Ladder Diagram pour la logique combinatoire et les sécurités, le Séquentiel Fonction Chart pour la séquence d'irrigation automatique, et le Structure Texte pour les algorithmes de calcul et de diagnostic [1, 15, 17, 22].

Les résultats des tests de validation démontrent la conformité du système aux exigences du cahier des charges : temps de réponse aux défauts inférieur à 500 ms, bascule automatique des pompes en moins de 5 secondes avec maintien de la zone active, transmission des alarmes SMS en moins de 10 secondes, et séquence d'irrigation complète exécutée sans intervention humaine. Le capteur de pluie, traité comme arrêt d'urgence conditionnel, assure la protection du système face aux intempéries avec reprise automatique [1, 6, 7, 15, 20].

La modularité du programme, structuré en blocs fonctionnels réutilisables, permet une maintenance simplifiée et une évolution future du système. Les perspectives d'amélioration incluent l'intégration d'un module météo connecté pour la prévision des besoins en irrigation, et l'ajout d'un algorithme d'optimisation par intelligence artificielle pour l'apprentissage des seuils adaptatifs selon les saisons et les types de culture [1, 2, 5, 17].

Conclusion Générale

Ce projet a été consacré à la conception et à la réalisation d'un système de pompage intelligent et autonome dédié à l'irrigation agricole. Il s'inscrit pleinement dans une démarche de modernisation de l'agriculture de précision et d'optimisation de la gestion des ressources hydriques. Au terme de cette étude, les objectifs clés ont été atteints tant sur le plan de l'infrastructure matérielle que sur celui du développement logiciel et de la supervision industrielle.

Le dimensionnement rigoureux de l'installation a permis de structurer une architecture globale robuste. Elle est centrée autour de l'Automate Programmable Industriel (API) Siemens S7-1200 (CPU 1214C), épaulé par son module d'extension analogique SM 1231. Ce choix garantit une acquisition de données déterministe et fiable à travers un réseau de capteurs de terrain. Ces derniers mesurent l'humidité du sol sur quatre zones distinctes, la pression, le débit, les vibrations et la pluviométrie. L'utilisation du standard industriel 4-20 mA pour la transmission des signaux analogiques assure une excellente immunité aux parasites électromagnétiques sur les longues distances propres aux exploitations réelles.

Côté puissance, le système valide une configuration à cinq moteurs au total. Un moteur immergé de forage de 7,5 kW utilise un démarrage étoile-triangle pour lisser les appels de courant. Quatre pompes de surface de 3 kW sont réparties en deux groupes principaux et deux groupes de secours. Ces pompes fonctionnent en mode d'alternance et de redondance active. Cela sécurise la continuité de service en cas de défaillance mécanique et prolonge la durée de vie des équipements. De plus, la séparation physique des circuits de puissance et de commande protège efficacement l'unité centrale.

L'intelligence embarquée de cette installation a été entièrement modélisée et implémentée sous l'environnement TIA Portal V17. En adoptant une approche modulaire combinant le GRAFCET pour la gestion séquentielle des modes de marche et le langage Ladder pour la logique de sécurité, nous avons développé des algorithmes d'irrigation intelligents régis par les seuils pédoclimatiques des cultures. Le programme intègre également une routine de diagnostic séquentiel par analyse de pression. Elle permet de localiser précisément les fuites ou les obstructions sur le réseau de distribution. Pour l'exploitation sur site, l'interface Homme-Machine (IHM) développée sur l'écran tactile KTP700 Basic offre un suivi en temps réel complet via des synoptiques dynamiques, des courbes de tendances et un historique des alarmes. Cette supervision est complétée à distance par le module GSM CP 1243-1. Il assure l'envoi automatisé de SMS d'alerte à l'exploitant en cas de défaut critique, une solution parfaitement adaptée aux contraintes des zones rurales isolées.

En conclusion, ce projet démontre avec succès l'intérêt de substituer à l'irrigation manuelle empirique une régulation automatisée de niveau industriel. Celle-ci est capable de maximiser les rendements agricoles tout en évitant le gaspillage énergétique et hydrique.

En guise de perspectives, ce travail ouvre la voie vers les technologies de l'Agriculture 4.0. Trois axes majeurs de développement se dégagent :

- Intégration d'algorithmes d'Intelligence Artificielle : pour la prédiction des besoins en eau à court terme en croisant les données des capteurs avec des API météo cloud.
- Développement d'une plateforme Web SCADA ou IoT : pour permettre une supervision décentralisée et accessible directement sur smartphone.
- Couplage avec des générateurs photovoltaïques : afin de parfaire l'autonomie énergétique globale de ce système de pompage écologique.

Références

A. Articles Scientifiques et Ouvrages :

Réf.	Détail bibliographique
[1]	MORSI, I., & AHMED, M. (2024). Smart irrigation system using PLC, SCADA, and fuzzy control. <i>IEEE Access</i> , 8(6), 9101–9120. → <i>Étude de cas concrète avec résultats chiffrés sur les économies d'énergie.</i>
[2]	TIERCELLIN, J.-R., & VIDAL, A. (2014). Maîtrise de l'irrigation et des équipements d'irrigation. Éditions France Agricole, Paris.
[3]	MAILLET, I., & BOURRIE, G. (2017). Génie Rural : Irrigation et drainage. Éditions Tec & Doc — Lavoisier.
[4]	PHOCAIDES, A. (2007). Handbook on Pressurized Irrigation Techniques. FAO, Rome.
[5]	BROUZES, C., & GILLES, B. (2018). Les capteurs en agriculture : de la mesure à la décision. Éditions Quae.
[24]	CARDON, A., & KOSCIELNIAK, H. (2015). Automates Programmables Industriels — Programmation en Ladder, SFC et ST. Éditions Dunod, Paris. → <i>Utilisé pour III.4 GRAFCET et III.5 Ladder.</i>
[25]	GEORGE, D., & JAMMES, B. (2019). Réseaux de terrain industriels et bus de terrain. Éditions Hermès-Lavoisier, Paris. → <i>Utilisé pour II.7 PROFINET/Modbus et III.7.</i>
[26]	THOMAS, R. (2018). Capteurs industriels : technologie et mise en œuvre. Éditions Techniques de l'Ingénieur, Paris. → <i>Utilisé pour II.3.1–II.3.5 (ultrasons, pluie, débit, pression, vibration).</i>

B. Thèses et Mémoires Universitaires

Réf.	Détail bibliographique
[6]	BENALI, M. (2021). Conception et réalisation d'un système d'irrigation intelligent basé sur un API. Mémoire de Master, Université de Blida 1, Algérie.
[7]	KHELIFI, R. (2020). Automatisation d'un système d'irrigation goutte à goutte à l'aide d'un API et supervision. Mémoire de Master, Université de Sfax, Tunisie.

C. Sites Web et Ressources Techniques

Réf.	Détail bibliographique
[8]	HUNTER INDUSTRIES. Catalogue technique et guides de conception. [En ligne]. https://www.hunterindustries.com (Consulté Mars 2026).
[9]	NETAFIM FRANCE. Ressources techniques sur l'irrigation goutte-à-goutte. [En ligne]. https://www.netafim.fr (Consulté Mars 2026).
[10]	SCHNEIDER ELECTRIC. Documentation technique sur les API Modicon. [En ligne]. https://www.se.com/fr (Consulté Mars 2026).
[11]	FAO. Portail de l'eau : Irrigation. [En ligne]. https://www.fao.org/land-water/water/fr/ (Consulté Mars 2026).
[12]	AKPLAS. Catalogue technique des tubes et raccords HDPE/MDPE. [En ligne]. https://www.akplas.net (Consulté Mars 2026).

[13]	SERDRIP. Guide technique pour la conception de systèmes d'irrigation localisée. [En ligne]. https://www.serdrip.com (Consulté Mars 2026).
[15]	SIEMENS AG. (2021). S7-1200 Automate programmable — Manuel système (CPU 1214C). https://support.industry.siemens.com (Consulté Mars 2026). → <i>Référence principale Ch. II : cycle scrutation, bilan E/S, modules.</i>
[16]	SIEMENS AG. (2022). Module SM 1231 — Manuel produit (entrées analogiques 4-20 mA). https://support.industry.siemens.com (Consulté Mars 2026).
[17]	SIEMENS AG. (2023). TIA Portal V17 — Programmation API S7-1200 : Ladder, SFC, ST, WinCC. https://support.industry.siemens.com (Consulté Mars 2026). → <i>Référence principale Ch. III : tous les langages et la configuration IHM.</i>
[18]	SIEMENS AG. (2021). KTP700 Basic — Manuel d'utilisation et de configuration IHM (800×480 px). https://support.industry.siemens.com (Consulté Mars 2026).
[19]	SIEMENS AG. (2022). Module CP 1243-1 — Communication GSM/GPRS avec l'API S7-1200. https://support.industry.siemens.com (Consulté Mars 2026).
[20]	SIEMENS AG. (2020). SIMATIC S7 PLCSIM — Simulation de l'API sous TIA Portal V17. https://support.industry.siemens.com (Consulté Mars 2026).

D. Normes Techniques

Réf.	Détail bibliographique
[14]	NF EN 12484-1 (2016). Matériels et systèmes d'irrigation — Systèmes de régulation automatique — Partie 1. AFNOR.
[21]	CEI 61131-3 (2013). Automates programmables industriels — Partie 3 : Langages de programmation (Ladder, SFC, ST, FBD, IL). Commission Électrotechnique Internationale. → <i>Norme fondamentale Ch. III.</i>
[22]	NF EN 60947-4-1 (2019). Appareillage basse tension — Contacteurs et démarreurs électromécaniques. AFNOR. → <i>II.4.5 démarrage étoile-triangle, III.2.</i>
[23]	NF EN 60529 (2014). Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP). AFNOR. → <i>II.3 & II.4 : IP des capteurs et actionneurs en milieu agricole humide.</i>

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Automatique et systèmes

Thème :

Conception et Réalisation d'un Système de Pompage Intelligent et Autonome pour l'Irrigation

Par : HERIZI djamal Eddine

CHATRA Mohamed Nouh

Résumé :

Face à la raréfaction des ressources hydriques, les systèmes d'irrigation intelligents offrent une solution efficace pour optimiser l'agriculture. Ce travail présente la conception d'un système de pompage et d'irrigation autonome basé sur un API Siemens S7-1200. Grâce à des capteurs (humidité du sol, niveau d'eau, pression, débit et pluie), le système assure une surveillance continue des paramètres agricoles et hydrauliques. L'API analyse les données et commande automatiquement pompes et électrovannes selon les besoins des cultures. Les résultats montrent une gestion optimisée de l'eau, une réduction de la consommation énergétique et une fiabilité accrue. La simulation sous TIA Portal valide la robustesse de la solution proposée.

Mots clés :

Irrigation intelligente, API S7-1200, Capteurs, Automatisation, Gestion de l'eau, TIA Portal.

Abstract :

With increasing water scarcity, smart irrigation systems have become essential for efficient agriculture. This work presents the design of an autonomous pumping and irrigation system based on a Siemens S7-1200 PLC. Using sensors for soil moisture, water level, pressure, flow rate and rainfall, the system continuously monitors environmental and hydraulic conditions. The PLC processes data and automatically controls pumps and solenoid valves according to crop needs. Results demonstrate improved water management, reduced energy consumption and enhanced reliability. TIA Portal simulations confirm the robustness of the proposed solution.

Keywords :

Smart irrigation, S7-1200 PLC, Sensors, Automation, Water management, TIA Portal.

ملخص :

في ظل ندرة المياه المتزايدة، أصبحت أنظمة الري الذكية حلاً ضرورياً لتحسين الإنتاجية الزراعية. يقدم هذا العمل يستخدم النظام حساسات لرطوبة Siemens S7-1200 تصميم نظام ضخ وري ذكي يعتمد على المتحكم الصناعي التربة، مستوى المياه، الضغط، التدفق والأمطار لمراقبة مستمرة للظروف الزراعية. يعالج المتحكم البيانات ويتحكم تلقائياً في المضخات والصمامات الكهربائية حسب احتياجات المحاصيل. أظهرت النتائج تحسين استغلال المياه، تقليل استهلاك متانة الحل المقترح TIA Portal الطاقة وزيادة الموثوقية. أكدت محاكاة

الكلمات المفتاحية:

، الحساسات، الأنتمة، إدارة المياه، الصمامات الكهربائية، نظام الضخ، S7-1200 الري الذكي، المتحكم الصناعي TIA Portal.