

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF -M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



N° :.....

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ÉLECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par :HEBOUB TARIQ

Intitulé :

Réalisation d'un système automatique de régulation de l'ammoniac dans
un aquarium

Soutenu publiquement devant le jury :

Prof. OUALI Mohammed Assam	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Prof. BENNACER Hamza	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Encadrant
Prof. LADJAL Mohamed	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Co-encadrant
Prof. DJRIOUI Mohamed	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur
	Université Mohamed Boudiaf M'sila	CDE-M'sila

Sommaire

Dédicaces.....	I
Remerciements.....	II
Listedesfigures.....	III
Listedestableaux.....	IV
Introduction Générale	V

CHAPITRE I : Étude théorique sur l'aquaculture et la qualité des eaux

Introduction	2
I.1. Généralités sur l'aquaculture	3
I.2. Pisciculture dans le monde	5
I.3. Pisciculture en Algérie	8
I.4. Qualité des eaux en pisciculture	11
I.4.1. Température	12
I.4.2. Ph	13
I.4.3. Turbidité	16
I.4.4. Oxygène dissous	17
I.5. Importance des systèmes intelligents en pisciculture.....	19
Conclusion	20

CHAPITRE II : Chaîne d'acquisition de données

II.1. Introduction	21
II.2. Notion de chaîne d'acquisition	21
II.3. Structure détaillée de la chaîne d'acquisition.....	21
II.3.1. Le capteur	21
II.3.2. Conditionnement du signal	22
II.3.3. Conversion analogique-numérique	22
II.3.4. Unité de traitement (Arduino)	23
II.4. Étude détaillée des capteurs	23
II.4.1. Capteur de température	23
II.4.2. Capteur de Ph	24
II.4.3. Capteur de turbidité	25
II.4.4. Capteur ultrason	26

II.5. Présentation détaillée de Arduino	27
II.5.1. Fonctionnement	27
II.5.2. Avantages	27
II.6. Fonctionnement global du système	28
II.7. Analyse globale du système	28
II.8. Conclusion	29
CHAPITRE III : Étude Approfondie, Conception Matérielle et Simulation du Système	
III.1. Introduction	30
III.2. Architecture Topologique du Système et Flux des Signaux.....	31
III.2.1. Le Bloc d'Acquisition et de Numérisation (Sensing Stage)	32
III.2.2. Le Bloc de Traitement Logique Central (Processing Unit)	32
III.2.3. Le Bloc de Puissance, de Commande et d'Isolation (Actuator Stage)	32
III.2.4. Le Bloc d'Interface Homme-Machine (Display Stage).....	32
III.3. Environnement Logiciel et Outils de Développement	33
III.3.1. Arduino IDE (Integrated DevelopmentEnvironment)	33
III.3.2. Proteus 8 Professional (ISIS)	33
III.4. Analyse Hardware et Modélisation Mathématique.....	33
III.4.1. Le Microcontrôleur ATmega328P (Arduino Nano).....	33
III.4.2. Modélisation du Capteur de Température.....	33
III.4.3. Modélisation du Capteur de Potentiel Hydrogène (pH)	34
III.4.4. Modélisation du Capteur de Turbidité	34
III.4.5. Le Capteur Ultrasonique de Niveau (HC-SR04).....	34
III.5. Schéma Électrique de Simulation et Cartographie des Broches.....	35
III.6. Simulation Globale sous Proteus.....	36
III.7. Algorithme de Contrôle Avancé et Machine à États (Control Logic)	37
III.7.1. État 0 : Le Mode de Surveillance Stationnaire (Idle Mode).....	37
III.7.2. État 1 : Le Mode de Vidange (Evacuation Mode)	38
III.7.3. État 2 : Le Mode de Remplissage et Restauration (Refilling Mode)	38
III.8. Réalisation Matérielle du Prototypé (Application Pratique)	38
III.9. Discussion Technique sur les Systèmes Intelligents en Pisciculture	39
III.10. Perspectives d'Évolution Technologique Majeures	39

III.10.1. Intégration de l'Internet des Objets (IoT) et Supervision Mobile.....	39
III.10.2. Intégration d'un Système d'Alimentation Automatique Intelligent (Smart Feeder)...	39
III.11. Conclusion du Chapitre	40
Conclusion Générale	41
Références	43

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, et la gratitude que je vous porte. Merci pour vos sacrifices, vos prières et votre soutien inconditionnel. Que Dieu vous protège.

Mes frères et sœurs : Pour leur affection, leur présence et leurs encouragements continuels.
Toute ma famille : Proche et lointaine.

Mes précieux amis : Qui ont partagé avec moi les moments de doute et de joie, et qui ont toujours cru en moi.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à mon encadrant, **Prof. BENNACER Hamza**, qui a assuré le suivi de ce projet en tant que Rapporteur, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et ses orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont fait l'honneur d'évaluer notre travail :

- **Prof. OUALI Mohammed Assam**, pour avoir accepté de présider ce jury.
- **Prof. LADJAL Mohamed**, pour sa contribution en tant que Co-encadrant.
- **Prof. DJRIOUI Mohamed**, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant d'en être l'Examineur.

Nous tenons à exprimer une reconnaissance particulière au **CDE M'Sila** (Centre de Développement de l'Entrepreneuriat) ainsi qu'aux encadrants du programme de formation **Trie**, pour leur précieux accompagnement, leurs conseils avisés et leur soutien tout au long du développement de notre projet.

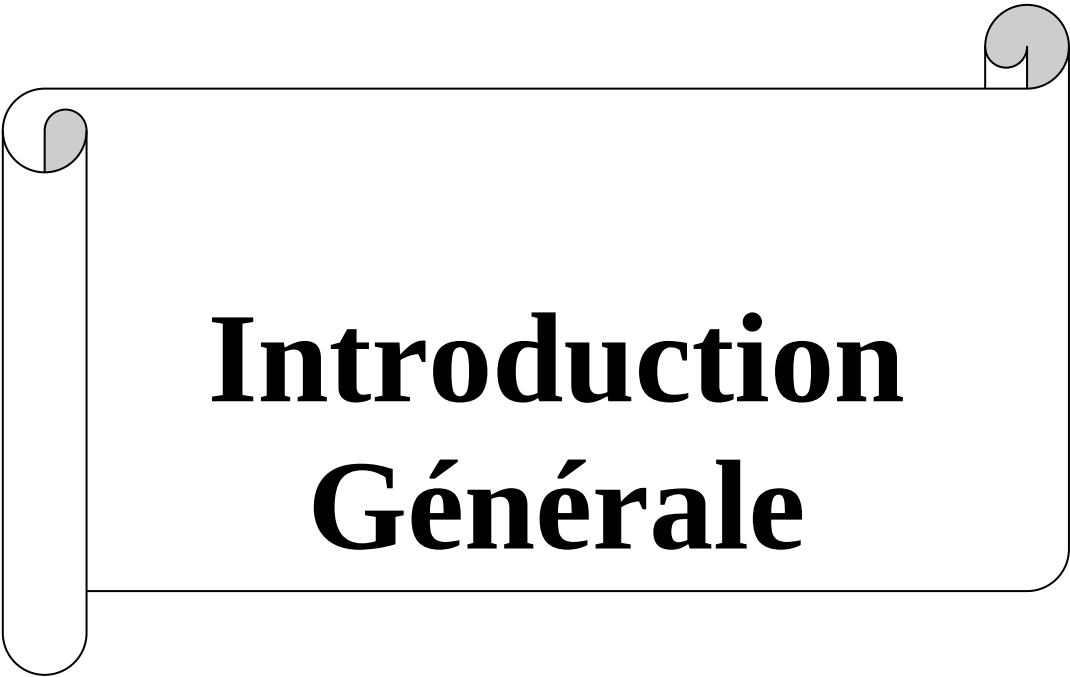
Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles, nos amis, et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet de fin d'études.

2. Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Niveaux d'intensification.....	5
Tableau I.2 : Espèces aquatiques	7
Tableau I.3 : Les sites potentiels existants en Algérie.....	9
Tableau I.4 : Les potentiels hydriques existants en Algérie.....	9
Tableau I.5 : Principales espèces aquatiques pouvant être développées en aquaculture en Algérie.....	10
Tableau I.6 : Température optimale des poisson.....	13
Tableau I.7 : Valeurs du pH aux limite poissons.....	15
Tableau I.8 : Effets de la turbidité sur les poissons.....	17
Tableau I.9 : Niveau d'oxygène dissous	18
Tableau III.1 : Cartographie d'interfaçage matériel de la carte Arduino Nano.....	35
Tableau III.2 : Avantages des systèmes intelligents en pisciculture.....	42

3. Liste des Figures

Figure I.1 : Part respective de l'aquaculture et de la pêche dans la consommation mondiale de poisson	4
Figure I.2 : Production halieutique et aquacole mondiale.....	4
Figure I.3 : Production mondiale de poissons d'élevage destinée à la consommation.....	6
Figure I.4 : Évolution de la production aquacole globale en Algérie (2000-2017).....	9
Figure II.1 : Capteur de température DS18B20.....	24
Figure II.2 : Capteur de pH	24
Figure II.3 : Capteur de turbidité.....	25
Figure II.4 : Capteur ultrason.....	26
Figure II.5 : ARDUINO NANO	27
Figure II.6 : Fonctionnement global du système.....	28
Figure II.7 : Analyse globale du système.....	28
Figure III.1 : L'interface d'arduino ide	33
Figure III.2 : Le logiciel Proteus	33
Figure III.3 : Pinoutdiagram de la carte de développement Arduino Nano.....	33
Figure III.4 : Schéma de simulation globale du système Ammonia Tech sous Proteus 8 Professional	36
Figure III.5 : Vue réelle du prototype matériel finalisé et fonctionnel du système.....	38

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black border. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a dark gray shadow. The text is centered on the unrolled portion.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'aquaculture, et plus particulièrement la pisciculture, représente aujourd'hui l'un des secteurs alimentaires les plus stratégiques à l'échelle mondiale pour répondre aux besoins nutritionnels croissants de la population et faire face à la diminution des ressources issues de la pêche traditionnelle [1]. En Algérie, le développement de cette filière bénéficie d'un potentiel hydrique considérable à travers les barrages, les nappes phréatiques et les ressources sahariennes [2]. Cependant, la réussite d'un élevage piscicole dépend de manière critique du maintien d'un environnement aquatique stable. Toute perturbation des paramètres physico-chimiques de l'eau — tels que la température, le pH, la turbidité et l'oxygène dissous — peut affecter gravement la santé des poissons. Notamment, une élévation du pH amplifie directement la toxicité de l'ammoniac (NH_3), ce qui représente une menace fatale pour l'écosystème de l'aquarium [3].

Les méthodes traditionnelles de surveillance manuelle des bassins n'offrent pas la réactivité nécessaire pour prévenir les variations brusques de la qualité de l'eau, ce qui engendre des pertes économiques et biologiques importantes [4]. Face à ces défis, l'intégration des technologies électroniques et de l'automatisation s'impose comme une nécessité [5]. Dès lors, la problématique centrale de notre travail se décline à travers les questions suivantes :

- Comment concevoir une chaîne d'acquisition de données capable de surveiller en temps réel les paramètres environnementaux critiques d'un aquarium ?
- Comment piloter de façon autonome des actionneurs hydrauliques pour réguler automatiquement le niveau de pollution et stabiliser le milieu biologique sans intervention humaine ?

Pour répondre à cette problématique, nous formulons l'hypothèse qu'un système d'ingénierie asservi en boucle fermée, articulé autour d'un microcontrôleur accessible et robuste tel que l'Arduino Nano, permet d'acquérir, de traiter et de réagir instantanément aux fluctuations physiques de l'eau. L'objectif principal de ce projet est donc de concevoir, modéliser et simuler une solution embarquée autonome, basée sur une machine à états finis, capable de déclencher des cycles automatiques de vidange d'eau contaminée et de remplissage d'eau propre dès qu'un seuil critique est franchi.

Pour valider cette approche et structurer notre étude, ce mémoire est organisé en trois chapitres fondamentaux :

CHAPITRE I : Étude théorique sur l'aquaculture et la qualité des eaux

Ce premier chapitre présente un état de l'art sur la pisciculture dans le monde et en Algérie. Il expose une analyse approfondie des paramètres physico-chimiques (température, pH, turbidité, oxygène dissous) qui régissent la vie des poissons et justifie l'importance de l'introduction des systèmes intelligents dans ce secteur.

CHAPITRE II : Chaîne d'acquisition de données

Dédié à l'architecture matérielle initiale, ce chapitre décortique la notion de chaîne d'acquisition, allant du capteur au conditionnement du signal, jusqu'à la conversion analogique-numérique (ADC) de 10 bits du microcontrôleur. Une étude détaillée y est menée sur les capteurs choisis (DS18B20, pH, turbidité, et ultrason HC-SR04) ainsi que sur la plateforme Arduino.

CHAPITRE III : Étude approfondie, conception matérielle, simulation, et réalisation du système

Ce dernier chapitre constitue le cœur applicatif de notre travail. Il présente l'architecture topologique en boucle fermée, la modélisation mathématique des capteurs, la cartographie des broches (Pin Mapping) et l'algorithme de contrôle avancé en langage C. Enfin, il expose les résultats de la simulation dynamique réalisée sous Proteus 8 Professional et ouvre des perspectives technologiques majeures telles que l'intégration de l'Internet des Objets (IoT via ESP32) et d'un système d'alimentation intelligent (Smart Feeder).



CHAPITRE I

Introduction

L'aquaculture représente aujourd'hui l'un des secteurs alimentaires les plus importants dans le monde en raison de son rôle essentiel dans la satisfaction des besoins alimentaires croissants de la population mondiale. Au cours des dernières décennies, ce secteur a connu une croissance remarquable grâce au développement des techniques modernes d'élevage et à l'augmentation continue de la demande en produits halieutiques. En parallèle, les ressources issues de la pêche traditionnelle ont diminué progressivement à cause de la surexploitation des ressources marines et de la pollution environnementale, ce qui a poussé plusieurs pays à développer des systèmes modernes de pisciculture afin d'assurer la sécurité alimentaire et de répondre aux besoins du marché [6].

Les poissons constituent une source importante de protéines animales, de vitamines et de sels minéraux nécessaires à l'organisme humain. Leur consommation contribue à l'amélioration de l'alimentation et à la réduction de plusieurs maladies liées à la malnutrition. Pour cette raison, l'intérêt porté au secteur de la pisciculture ne cesse d'augmenter dans plusieurs pays du monde [7].

La réussite des systèmes d'élevage piscicole dépend principalement de la qualité des eaux utilisées dans les bassins, car l'eau représente le milieu de vie des poissons. Toute variation des paramètres physicochimiques tels que la température, le pH, la turbidité ou l'oxygène dissous peut provoquer des perturbations importantes influençant directement la croissance, la santé et la reproduction des poissons [8].

Avec le développement technologique moderne, plusieurs systèmes intelligents basés sur les capteurs électroniques et les microcontrôleurs ont été développés afin de surveiller continuellement la qualité des eaux et d'assurer des conditions optimales dans les bassins piscicoles. Ces systèmes automatisés ont permis d'améliorer la productivité et de réduire les pertes liées à la dégradation des paramètres environnementaux [9].

L'objectif de ce chapitre est de présenter une étude théorique détaillée sur l'aquaculture et la pisciculture, ainsi que les différents systèmes d'élevage utilisés dans le

monde et en Algérie, tout en mettant l'accent sur l'importance de la qualité des eaux et le rôle des systèmes intelligents dans le contrôle automatique des bassins piscicoles.

I.1. Généralités sur l'aquaculture

L'aquaculture est considérée comme l'un des secteurs économiques et alimentaires les plus importants dans le monde. Depuis l'Antiquité, plusieurs civilisations utilisaient les milieux aquatiques pour élever des organismes vivants destinés à l'alimentation humaine. Avec le temps, ce secteur a connu une évolution importante grâce au développement des techniques modernes d'élevage et de contrôle des paramètres environnementaux [6].

L'aquaculture désigne l'élevage des organismes aquatiques dans des milieux naturels ou artificiels dans le but de produire des ressources alimentaires ou commerciales. Elle comprend l'élevage des poissons, des crustacés, des mollusques ainsi que la culture des algues [7].

Cette activité peut être réalisée dans différents types d'installations tels que :

- Les étangs,
- Les bassins en béton,
- Les cages flottantes,
- Les barrages,
- Les réservoirs artificiels.

Les systèmes modernes d'aquaculture utilisent souvent des techniques avancées telles que les systèmes de recirculation des eaux et les systèmes automatisés permettant le contrôle continu de la qualité des eaux [8].

Aujourd'hui, l'aquaculture représente l'un des secteurs alimentaires connaissant la croissance la plus rapide au monde. Selon les rapports de la FAO, la production aquacole mondiale augmente continuellement, notamment dans les pays asiatiques qui dominent largement ce secteur [6].

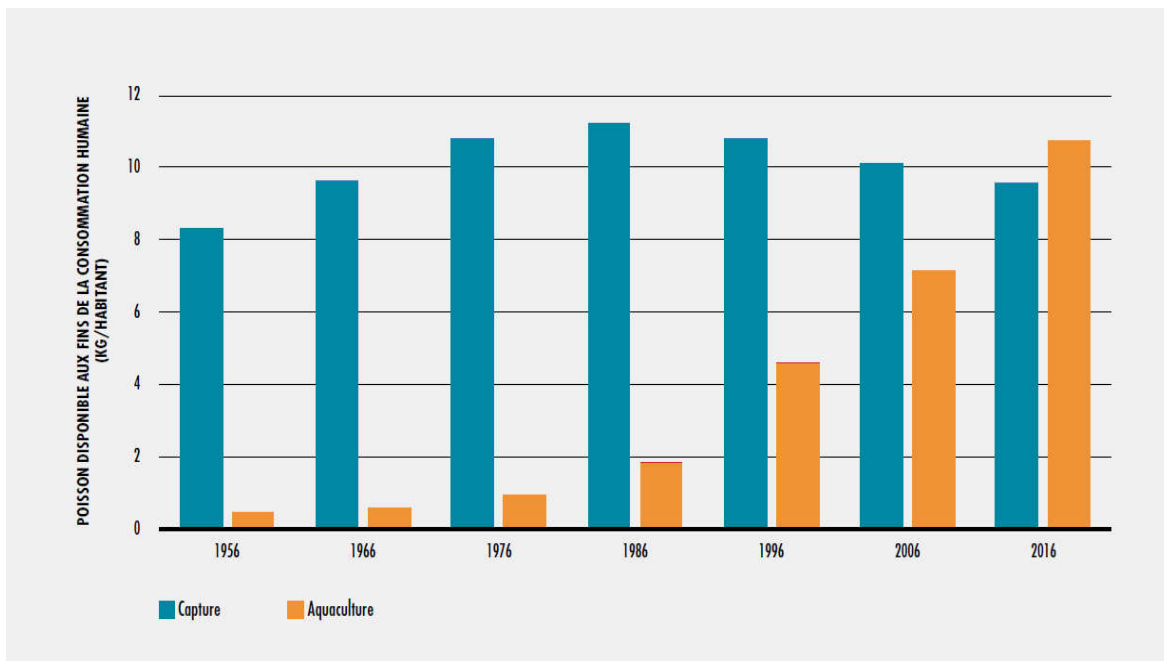


Figure I.1 : Part respective de l'aquaculture et de la pêche dans la consommation mondiale de poisson[10]

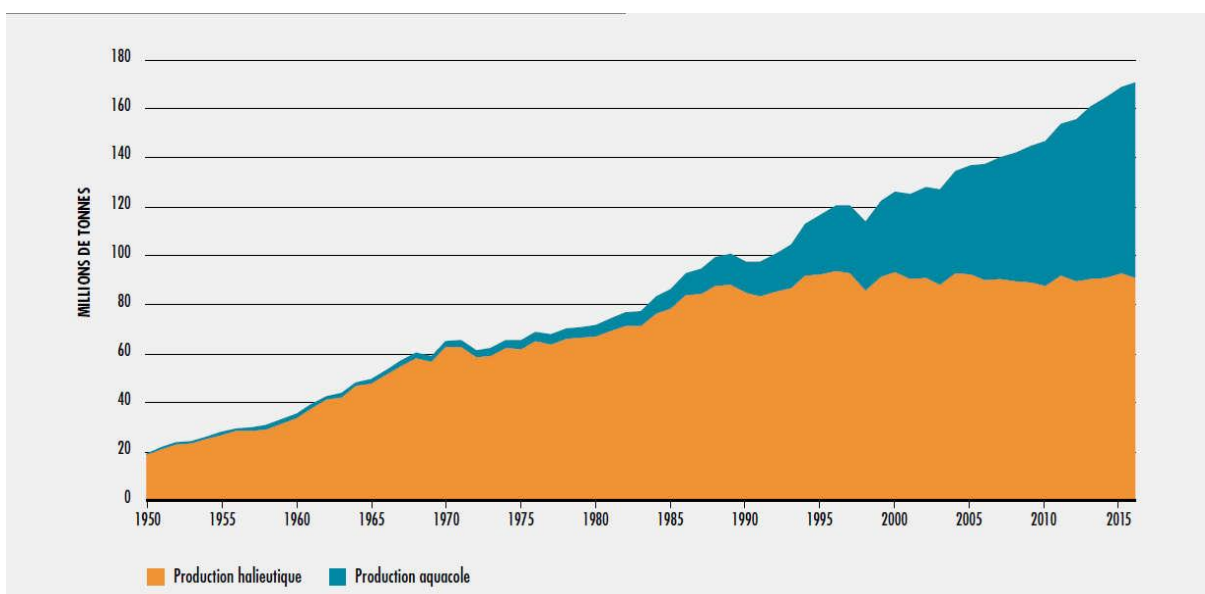


Figure I.2 : Production halieutique et aquacole mondiale [11]

Le développement de l'aquaculture a permis d'obtenir plusieurs avantages économiques, sociaux et alimentaires. Ce secteur contribue à assurer la sécurité alimentaire mondiale en fournissant une source importante de protéines animales. Il participe également à la création d'emplois dans plusieurs domaines tels que la production, le transport, la commercialisation et la maintenance des installations aquacoles [9].

L'aquaculture joue également un rôle important dans la réduction de la pression exercée sur les ressources halieutiques naturelles grâce à la diminution de la pêche intensive dans les milieux marins [7].

Tableau I.1 : Différents niveaux d'intensification des systèmes d'élevage piscicole[12].

Niveau d'intensification	Extensif		Semi- intensif		Intensif	Super intensif
Densité de mise en charge	< 0.1 /m ²	0.1 à 1/ m ²	1 à 5 /m ²		5à10/ m ²	10à100/m ² B :,
Structure d'élevage	Etangpetit barrage mare		Etang		Etangcage	Etang,bassin Hors sol Racewaysenclos
Rendement (t/ ha / an)	0-0.3	0.3-1	1à 5	5 à 15	15 à 50	50etplusjusqu'à 200kg .m3
Empoissonnement	Leplussouvent Polyculture		Polyculture		En général, Monoculture	Monoculture
Intrants	Peuoupasd'intrants		Fertilisants, Macrophytes aliment Simplesons, tourteaux)		Aliment Composé	Aliment équilibréavec Farines de poissons, Extrudé, Antibiotique
Tauxjournalierde Renouvellement de L'eau (%)	Apport naturel		Compensation despertes Aération		Recirculation de l'eau	Aération /oxygénation
Modèles	Semi-aquaculture		Aquaculturedeproduction			AquaculturedeTransformation

Malgré ses nombreux avantages, l'aquaculture peut provoquer certains problèmes environnementaux lorsqu'elle est mal gérée. Parmi ces problèmes figurent :

- La pollution des eaux,
- L'accumulation des déchets organiques,
- La diminution de l'oxygène dissous,
- La prolifération des bactéries et parasites.

Dans les systèmes intensifs, la forte densité de poissons favorise la propagation rapide des maladies en cas d'absence de contrôle permanent de la qualité des eaux [8].

Pour cette raison, les technologies modernes basées sur les capteurs électroniques et les systèmes intelligents sont devenues indispensables afin d'assurer une surveillance continue des paramètres physicochimiques des bassins piscicoles [9].

I.2. Pisciculture dans le monde

La pisciculture représente la branche la plus importante de l'aquaculture. Elle consiste à élever différentes espèces de poissons dans des bassins ou des cages aquatiques sous des conditions environnementales contrôlées afin d'assurer leur croissance et leur reproduction [7].

Ce secteur a connu un développement remarquable au cours des dernières années grâce à l'augmentation de la demande mondiale en poissons et à la diminution des ressources issues de la pêche traditionnelle [6].

Les systèmes piscicoles varient selon le niveau d'intensification et les techniques utilisées. On distingue généralement :

- Les systèmes extensifs.
- Les systèmes semi-intensifs.
- Les systèmes intensifs.
- Les systèmes super-intensifs.

Le système extensif est l'un des plus anciens systèmes de pisciculture. Il repose principalement sur les ressources alimentaires naturelles présentes dans l'eau sans utilisation importante d'aliments artificiels [8].

Ce système se caractérise par :

- Une faible densité de poissons.
- Des coûts réduits.
- Une faible production.

Le système semi-intensif combine les ressources naturelles et les aliments complémentaires afin d'améliorer la croissance des poissons [9].

Le système intensif repose sur l'élevage d'un grand nombre de poissons dans des espaces réduits tout en assurant :

- L'aération.
- L'alimentation artificielle.
- Le contrôle permanent de la qualité des eaux.

Ce système permet d'obtenir une production importante mais nécessite des équipements techniques avancés [8].

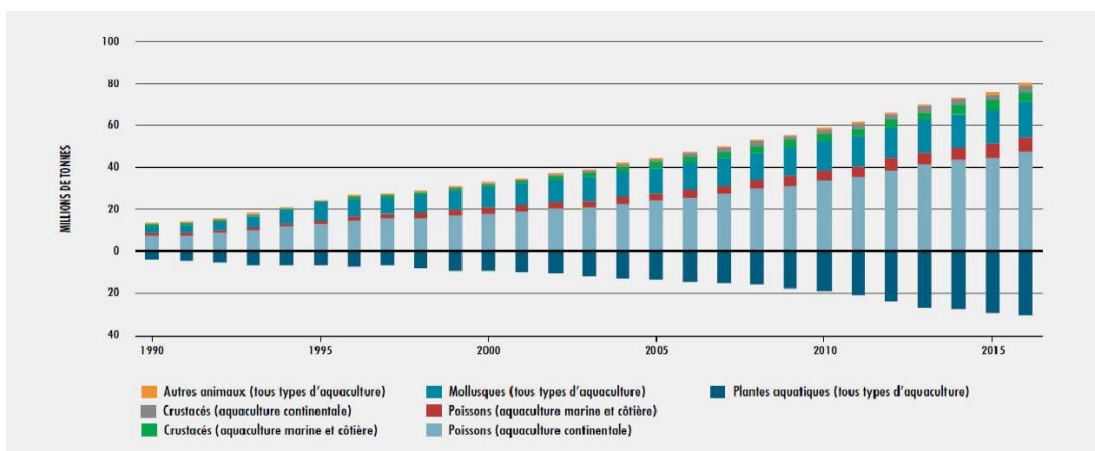


Figure I.3 : Production mondiale de poissons d'élevage destinée à la consommation [13].

Tableau I.2 : Principales espèces aquatiques élevées dans le monde[10].

Année Espèce	2010	2012	2014	2016	% du Total 2016
Carpe herbivore	4362	5018	5539	6068	11
Carpe argentée	4100	4193	4968	5301	10
Tilapia du Nil	2537	3260	3677	4200	8
Carpe à gros tete	2587	2901	3255	3527	7
Carassius sp.	2216	2451	2769	3006	6
Catla	2977	2761	2770	2961	6
Poisson d'œuf	1378	1942	2063	2362	4
Saumon de l'Atlantique	1437	2074	2348	2248	4
Labéo Roho	1133	1566	1670	1843	3
Tilapia	628	876	1163	1177	2
Clarias sp.	353	554	809	979	2
Poisson marin	477	585	684	844	2
Poisson tête de Serpent	377	481	511	518	1
Autres poissons	13933	15790	17452	19057	35
Total	38494	44453	79679	54091	100

Les systèmes super-intensifs représentent les technologies les plus modernes dans le domaine de la pisciculture. Ils utilisent des capteurs électroniques et des systèmes automatisés permettant le contrôle total des paramètres physicochimiques de l'eau tels que :

- La température,
- Le pH,
- La turbidité,
- L'oxygène dissous.

Ces systèmes permettent d'améliorer la production tout en réduisant les pertes et les risques sanitaires [9].

I.3. Pisciculture en Algérie

L'Algérie possède d'importantes ressources hydriques favorables au développement de l'aquaculture et de la pisciculture. Grâce à son long littoral méditerranéen, ses nombreux barrages, ses nappes phréatiques et ses ressources en eaux souterraines dans les régions sahariennes, le pays dispose d'un potentiel considérable permettant le développement de différentes formes d'élevage piscicole [7].

Les premières tentatives de pisciculture en Algérie remontent à la période coloniale, mais le véritable développement du secteur a commencé après les années 2000 grâce aux programmes nationaux de soutien à l'investissement aquacole. L'État algérien a mis en place plusieurs stratégies visant à développer la production halieutique nationale afin de réduire les importations et d'assurer une meilleure sécurité alimentaire [8].

Le ministère de la pêche et des ressources halieutiques encourage aujourd'hui plusieurs projets liés à :

- L'aquaculture continentale.
- L'aquaculture marine.
- L'aquaculture saharienne.
- Les systèmes intégrés agriculture-aquaculture.

Les régions sahariennes algériennes représentent un environnement favorable pour le développement du Tilapia grâce à la disponibilité des eaux souterraines et aux températures relativement élevées durant une grande partie de l'année [9].

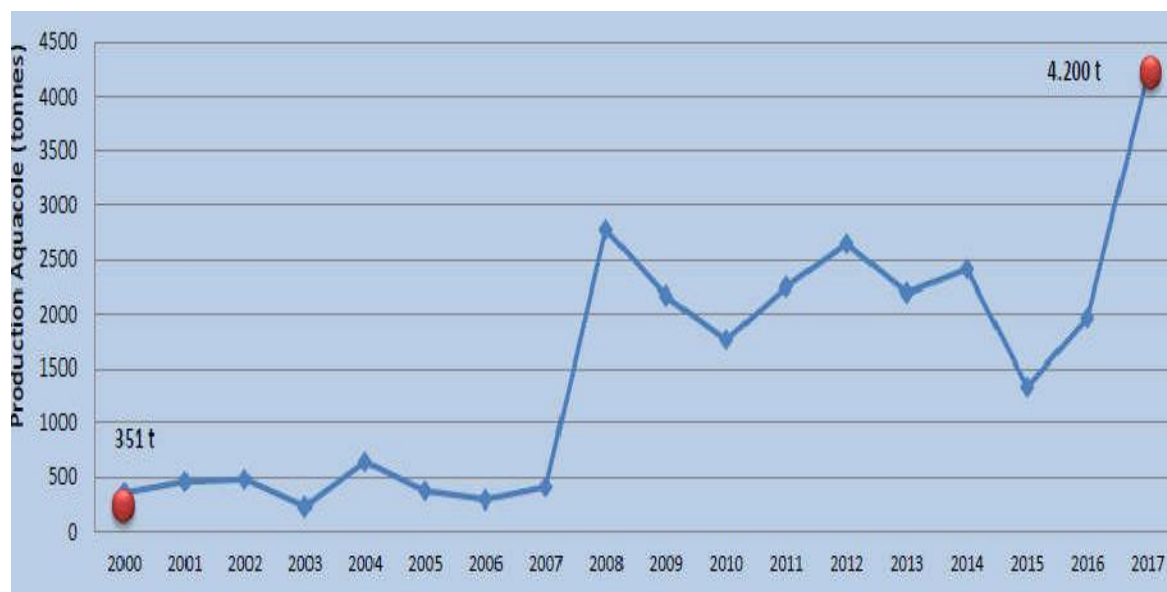


Figure I.4 : Évolution de la production aquacole globale en Algérie (2000-2017)[14].

Tableau I.3 : Les sites potentiels existants en Algérie[7].

Région	Potentielaquacole
Nord algérien	Barrages et littoral
Hauts plateaux	Bassinsartificiels
Sud algérien	Eaux souterraines

Tableau I.4 : Les potentiels hydriques existants en Algérie[7].

Ressource hydrique	Utilisation aquacole
Barrages	Pisciculture continentale
Nappes phréatiques	Aquaculture saharienne
Littoral	Aquaculture marine

Le secteur aquacole algérien connaît encore plusieurs difficultés malgré les ressources importantes disponibles. Parmi ces difficultés figurent :

- Le manque d'expérience technique.

- L'insuffisance des équipements modernes,
- Le coût élevé des aliments piscicoles,
- Le manque de systèmes intelligents de surveillance de la qualité des eaux.

Ces contraintes limitent parfois le développement de certains projets piscicoles et influencent directement la qualité de la production [8].

Afin d'améliorer les performances du secteur, plusieurs chercheurs et ingénieurs s'orientent aujourd'hui vers l'utilisation des technologies modernes basées sur :

- Les capteurs électroniques,
- Les systèmes automatisés,
- Les microcontrôleurs,
- Les systèmes de surveillance intelligents.

Ces technologies permettent d'assurer un meilleur contrôle des paramètres environnementaux et de réduire les pertes liées aux mauvaises conditions d'élevage [9].

Tableau I.5 : Principales espèces aquatiques pouvant être développées en aquaculture en Algérie[7].

Espèce	Zone adaptée
Tilapia	Sud Algérien
Carpe	Barrages
Dorade	Littoral

Parmi les espèces les plus élevées en Algérie, on retrouve principalement le Tilapia, la Carpe ainsi que certaines espèces marines telles que la Dorade et le Loup de mer. Le Tilapia représente actuellement l'une des espèces les plus importantes grâce à sa capacité d'adaptation aux conditions climatiques algériennes et à sa croissance rapide [7].

Les barrages algériens jouent également un rôle important dans le développement de la pisciculture continentale, notamment dans plusieurs wilayas du pays où des opérations d'ensemencement sont régulièrement réalisées afin d'augmenter la production piscicole nationale [9].

I.4. Qualité des eaux en pisciculture

La qualité des eaux constitue le facteur principal influençant directement la santé, la croissance et la reproduction des poissons dans les systèmes piscicoles. Les poissons vivent entièrement dans le milieu aquatique, ce qui signifie que toute modification des caractéristiques physicochimiques de l'eau peut avoir des conséquences importantes sur leurs fonctions biologiques [8].

Dans les systèmes modernes de pisciculture, le contrôle de la qualité des eaux représente une opération essentielle permettant de maintenir un environnement favorable au développement des poissons. Une mauvaise qualité de l'eau peut entraîner :

- Des maladies.
- Un ralentissement de la croissance.
- Une diminution de l'alimentation.
- Des perturbations respiratoires.
- Des mortalités importantes.

Les principaux paramètres physicochimiques influençant les poissons sont :

- La température,
- Le pH,
- La turbidité,
- L'oxygène dissous.

Ces paramètres doivent être surveillés continuellement afin d'éviter toute variation dangereuse pouvant perturber l'équilibre biologique du bassin [9].

La surveillance des paramètres de l'eau devient encore plus importante dans les systèmes intensifs où la densité des poissons est élevée. Dans ces systèmes, les déchets organiques et les restes d'aliments s'accumulent rapidement, ce qui peut provoquer une dégradation importante de la qualité des eaux [8].

Pour cette raison, les exploitations piscicoles modernes utilisent aujourd'hui des capteurs électroniques intelligents permettant de mesurer automatiquement les différents paramètres de l'eau et de transmettre les données aux systèmes de contrôle [9].

I.4.1 Température

La température est considérée comme l'un des paramètres physiques les plus importants influençant directement le milieu aquatique. Elle joue un rôle essentiel dans l'organisation des différentes activités biologiques des poissons telles que la respiration, la croissance, l'alimentation, la reproduction ainsi que les échanges métaboliques internes. Chaque espèce aquatique possède une capacité spécifique d'adaptation thermique selon son environnement naturel, son âge et ses caractéristiques biologiques [8].

Certaines espèces vivent dans les eaux froides tandis que d'autres préfèrent les eaux chaudes afin d'assurer une croissance normale et un bon développement physiologique. Les poissons tropicaux, comme le Tilapia, nécessitent généralement des températures relativement élevées pour assurer leur activité biologique [9].

La température influence directement la vitesse des réactions biologiques à l'intérieur du corps des poissons. Une augmentation de la température provoque généralement :

- Une accélération du métabolisme.
- Une augmentation de la consommation d'oxygène.
- Une élévation du rythme alimentaire.

À l'inverse, une diminution importante de la température entraîne :

- Un ralentissement de l'activité des poissons.
- Une réduction de l'appétit.

- Une diminution du taux de croissance.

Les variations brusques de température peuvent également provoquer un choc thermique susceptible d'entraîner des perturbations physiologiques graves pouvant conduire à la mortalité des poissons [8].

Dans les systèmes intensifs de pisciculture, le contrôle de la température devient particulièrement important en raison de la forte densité des poissons dans les bassins. Une température élevée provoque souvent une diminution de la concentration de l'oxygène dissous dans l'eau et favorise le développement des bactéries, des parasites et des maladies piscicoles [9].

Tableau I.6 : Température optimale des poissons [8].

Espèce	Température optimale
Tilapia	25-30°C
Carpe	20-28°C
Poisson-chat	24-30°C

Pour cette raison, les systèmes modernes de pisciculture utilisent aujourd'hui des capteurs électroniques permettant de mesurer la température de manière continue. Ces capteurs assurent une détection rapide des variations anormales et transmettent les données au microcontrôleur afin d'activer automatiquement les systèmes de refroidissement ou de renouvellement des eaux lorsque cela devient nécessaire [9].

I.4.2 Potentiel hydrogène

Le potentiel hydrogène (pH) représente l'un des paramètres chimiques les plus importants dans les systèmes aquacoles. Il permet de mesurer le degré d'acidité ou d'alcalinité de l'eau à l'aide d'une échelle variant généralement entre 0 et 14. Les faibles valeurs indiquent un milieu acide tandis que les valeurs élevées correspondent à un milieu alcalin [8].

Les poissons ont besoin d'un intervalle spécifique de pH afin d'assurer leurs fonctions biologiques normales. Toute variation importante du pH peut provoquer des troubles physiologiques affectant principalement les branchies, la respiration ainsi que les échanges ioniques au niveau des cellules. Une eau trop acide ou trop alcaline peut devenir dangereuse et provoquer des mortalités importantes, notamment dans les systèmes intensifs où les poissons sont élevés à forte densité [9].

Le pH influence également plusieurs réactions chimiques présentes dans l'eau telles que :

- La dissolution des sels minéraux.
- La toxicité de l'ammoniac.
- L'activité biologique des bactéries.
- Le développement des algues.

Une modification importante du pH peut donc perturber tout l'équilibre biologique du bassin piscicole [8].

L'intervalle optimal du pH pour la majorité des espèces piscicoles se situe généralement entre :

$$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$$

Lorsque le pH diminue fortement, l'eau devient acide et peut provoquer :

- Une irritation des branchies.
- Des difficultés respiratoires.
- Une diminution de l'activité des poissons.
- Une réduction de la croissance.

À l'inverse, une augmentation excessive du pH favorise la toxicité de certains composés chimiques tels que l'ammoniac, ce qui représente un danger important pour les organismes aquatiques [9].

Le pH de l'eau peut être influencé par plusieurs facteurs tels que :

- La qualité de l'eau.
- Les restes d'aliments.
- Les déchets organiques.
- L'activité des algues et des bactéries.
- La température.
- Les produits chimiques utilisés dans les bassins.

Dans les systèmes piscicoles intensifs, l'accumulation des déchets organiques et des aliments non consommés favorise souvent les variations importantes du pH, ce qui nécessite une surveillance continue afin de maintenir les valeurs dans les limites optimales [8].

Tableau I.7 : Seuils critiques du pH et leurs impacts physiologiques sur les poissons [8].

Valeur du pH	Effet
Inférieur à 6	Dangereux pour les poissons
6.5 – 8.5	Valeur optimal
Supérieur à 9	Toxique et dangereux

Pour cette raison, les exploitations piscicoles modernes utilisent aujourd'hui des capteurs électroniques permettant de surveiller continuellement les valeurs du pH et de transmettre les données aux systèmes de contrôle automatiques [9].

Le contrôle du pH permet d'améliorer considérablement la santé des poissons, de réduire les risques de maladies et de maintenir l'équilibre biologique à l'intérieur des bassins piscicoles, ce qui contribue directement à l'amélioration du rendement de production [8].

I.4.3 Turbidité

La turbidité représente l'un des paramètres physiques importants utilisés pour évaluer la qualité des eaux dans les bassins piscicoles. Elle correspond à la présence de particules solides en suspension dans l'eau qui réduisent sa transparence et modifient ses caractéristiques physiques [9].

Cette turbidité peut être provoquée par une multitude d'éléments en suspension au sein des bassins, notamment les restes d'aliments non consommés, les déchets organiques produits directement par les poissons, la prolifération d'algues microscopiques, les particules de sable et de terre introduites dans le milieu, ainsi que l'accumulation de bactéries et de matières organiques en décomposition. Dans les systèmes intensifs, la forte densité de poissons favorise généralement l'accumulation rapide de ces sédiments, ce qui entraîne une augmentation importante de la turbidité générale du milieu [8].

Une eau fortement trouble empêche la pénétration correcte de la lumière vers les couches profondes du bassin, ce qui réduit considérablement l'activité photosynthétique des organismes aquatiques utiles et perturbe l'équilibre biologique global du milieu [9]. De plus, la turbidité influence directement la santé de la faune aquatique. Les particules en suspension ont tendance à s'accumuler au niveau des branchies, ce qui perturbe gravement la respiration des poissons. Une exposition prolongée à un tel environnement provoque chez l'animal un stress important, une diminution nette de la croissance liée à une réduction flagrante de l'alimentation, ainsi qu'une augmentation des risques de contracter diverses maladies. Dans certains cas critiques, une turbidité excessive peut également engendrer une diminution drastique de l'oxygène dissous dans l'eau et favoriser le développement de bactéries pathogènes [8].

Tableau I.8 : Classification des niveaux de turbidité et leurs impacts sur le milieu piscicole [8].

Niveau de turbidité	Effet
Faible	Eau adaptée
Moyenne	Réduction de visibilité
Élevée	Risques respiratoires

Pour cette raison, plusieurs exploitations aquacoles modernes utilisent aujourd'hui des capteurs électroniques de turbidité permettant de mesurer continuellement la qualité visuelle des eaux et de détecter rapidement toute augmentation anormale des particules en suspension [9].

Ces capteurs transmettent les données au système de contrôle automatique afin d'activer les pompes de renouvellement ou les systèmes de filtration lorsque la turbidité dépasse les limites recommandées [8].

I.4.4 Oxygène dissous

L'oxygène dissous représente l'un des éléments les plus importants pour la survie des poissons et des organismes aquatiques. Les poissons utilisent l'oxygène présent dans l'eau afin d'assurer la respiration cellulaire et la production de l'énergie nécessaire à leurs activités biologiques [9]. La concentration de cet élément dans le milieu aquatique dépend étroitement de plusieurs facteurs combinés, tels que la température, le mouvement de l'eau, la densité de la population piscicole, l'activité des algues ainsi que la quantité de matières organiques présentes dans le bassin. À cet égard, une augmentation de la température provoque généralement une diminution de la quantité d'oxygène dissous disponible dans l'eau, ce qui représente un problème fréquent dans les systèmes piscicoles intensifs [8].

Lorsque ce taux devient insuffisant, plusieurs anomalies physiologiques et comportementales apparaissent rapidement au sein des élevages. Cela se manifeste notamment par des difficultés respiratoires, une réduction flagrante de l'appétit entraînant un ralentissement de la croissance, ainsi qu'une augmentation significative du stress qui peut conduire à des mortalités importantes. Face à cette hypoxie, les poissons affectés modifient leur comportement et remontent souvent vers la surface afin de piper l'air ou de chercher des zones temporairement plus riches en oxygène [9].

Dans les systèmes intensifs, la forte densité des poissons augmente considérablement la consommation d'oxygène. L'accumulation des déchets organiques et la décomposition des matières présentes dans l'eau consomment également une partie importante de l'oxygène disponible [8].

Tableau I.9 : Seuils critiques de l'oxygène dissous et leurs effets sur la faune piscicole [9].

Taux d'oxygène	Effet
Inférieur à 3 mg/L	Danger important
5 – 8 mg/L	Niveau adapté
Supérieur à 8 mg/L	Excellent

Afin de maintenir un niveau suffisant d'oxygène dans les bassins, les exploitations piscicoles utilisent généralement des aérateurs, des pompes ainsi que des systèmes de circulation des eaux pour assurer une oxygénation homogène et continue du milieu aquatique.

Les systèmes modernes utilisent également des capteurs électroniques capables de mesurer continuellement la concentration d'oxygène dissous et d'envoyer des signaux d'alerte lorsque les valeurs deviennent dangereuses [9].

I.5. Importance des systèmes intelligents en pisciculture

Avec le développement technologique moderne, les systèmes intelligents occupent aujourd'hui une place très importante dans les installations piscicoles modernes. Ces technologies permettent d'assurer une surveillance automatique et continue des différents paramètres physicochimiques de l'eau sans nécessiter une intervention humaine permanente [9].

Dans les systèmes traditionnels, le contrôle des bassins piscicoles repose principalement sur la surveillance manuelle effectuée par les exploitants. Cette méthode nécessite beaucoup de temps et ne permet pas toujours de détecter rapidement les variations dangereuses des paramètres de l'eau. Un simple retard dans l'intervention peut entraîner des pertes importantes dues à la mortalité des poissons [8].

Conclusion

En somme, ce premier chapitre nous a permis de cerner les fondements théoriques de l'aquaculture et de situer l'état de la pisciculture à l'échelle mondiale et nationale. Il ressort clairement que la viabilité biologique d'un écosystème aquatique fermé dépend d'un équilibre physico-chimique strict, où des paramètres tels que la température, le pH, la turbidité et l'oxygène dissous interagissent constamment. L'analyse de ces facteurs met en évidence la sensibilité des poissons, notamment face à la toxicité de l'ammoniac provoquée par les variations de pH. Face aux limites des méthodes de gestion traditionnelles, l'introduction des systèmes intelligents et automatisés s'avère être une nécessité incontournable pour sécuriser la production et optimiser la qualité des milieux d'élevage.



CHAPITRE II

II.1. Introduction

L'acquisition de données représente un élément fondamental dans les systèmes automatisés modernes. Elle permet de mesurer, surveiller et analyser des grandeurs physiques issues de l'environnement à l'aide de capteurs, afin de les transformer en informations exploitables par un système électronique.

Dans le domaine de l'aquaculture, la qualité de l'eau constitue un facteur déterminant pour la survie et le développement des organismes aquatiques. Des paramètres tels que la température, le pH, la turbidité, et le niveau d'eau influencent directement les conditions biologiques du milieu [15].

L'évolution technologique a permis l'intégration de systèmes intelligents basés sur des microcontrôleurs comme l'Arduino, permettant ainsi une surveillance en temps réel et une réaction automatique face aux variations des paramètres [16].

II.2. Notion sur la chaîne d'acquisition

Une chaîne d'acquisition est un ensemble de dispositifs permettant de transformer une grandeur physique en une donnée numérique exploitable. Elle est constituée de plusieurs blocs fonctionnels successifs, à commencer par le capteur, qui capte la grandeur physique, suivi du conditionnement du signal pour l'adapter et le filtrer, puis de la conversion analogique-numérique pour le numériser, et enfin du bloc de traitement. Chaque bloc joue un rôle essentiel dans la transformation progressive de l'information depuis sa forme physique jusqu'à sa forme numérique[17].

II.3. Structure détaillée de la chaîne d'acquisition

II.3.1 Le capteur

Le capteur est un élément fondamental permettant de mesurer une grandeur physique et de la convertir en un signal électrique.

Dans les systèmes aquacoles, les capteurs permettent une surveillance continue de l'environnement aquatique, ce qui est indispensable pour maintenir un équilibre biologique stable. Les performances d'un capteur sont définies par la précision, la sensibilité, et le temps

de réponse. Les capteurs utilisés dans ce projet sont adaptés à la mesure des paramètres critiques de l'eau [18].

II.3.2 le conditionnement du signal

Le signal délivré par un capteur est souvent faible et bruité, ce qui nécessite un traitement préalable avant son exploitation. Le conditionnement du signal comprend l'Amplification, le filtrage, et l'adaptation de tension. Cette étape est indispensable pour garantir la fiabilité des mesures [19].

II.3.3 Conversion analogique-numérique

Les capteurs fournissent généralement des signaux analogiques, tandis que les microcontrôleurs traitent des données numériques.

Le convertisseur analogique-numérique (ADC) permet de transformer une tension analogique en une valeur numérique. Concernant l'Arduino, l'ADC possède une résolution de 10 bits, ce qui permet de représenter une tension entre 0 et 5V par une valeur entre 0 et 1023 [16].

II.3.4 Unité de traitement (Microcontrôleur)

Un microcontrôleur est un circuit intégré qui regroupe les éléments essentiels d'un ordinateur sur une seule puce : un processeur (CPU), de la mémoire (RAM et Flash), et des ports d'entrées-sorties. Il est conçu pour exécuter des tâches de contrôle spécifiques dans les systèmes embarqués [17]. Dans notre cas, on a préféré d'utiliser l'Arduino.

L'Arduino est une plateforme électronique permettant de traiter les données issues des capteurs. Elle assure l'acquisition des données, leur traitement, et la prise de décision.

II.4. Aperçu sur les capteurs utilisés

La température de l'eau constitue un facteur environnemental déterminant au sein des systèmes aquacoles, car elle régit de manière directe l'ensemble de l'équilibre biologique et des processus biochimiques du milieu d'élevage. Sur le plan fonctionnel, ce paramètre critique est mesuré en continu à l'aide d'une sonde thermique étanche immergée dans le bassin, conçue spécifiquement pour capter les moindres variations de l'énergie thermique du fluide et transmettre instantanément ces informations sous forme de signaux électriques exploitables par l'unité de traitement centrale. L'importance d'un suivi rigoureux de la température réside dans son impact direct et immédiat sur les fonctions vitales de la faune aquatique, étant donné que ce facteur influence de façon majeure le métabolisme global des poissons, leur rythme de respiration, leur comportement alimentaire ainsi que leur dynamique de croissance. Une température anormalement élevée présente un double danger pour l'écosystème de l'aquarium : elle accélère la vitesse des réactions chimiques tout en réduisant drastiquement la capacité de dissolution de l'oxygène dans l'eau, ce qui provoque un état de stress thermique et respiratoire sévère chez les poissons [20]. Une analyse approfondie de ce phénomène montre que chaque espèce piscicole possède une plage thermique optimale bien spécifique, indispensable à son développement harmonieux, à sa reproduction et au maintien de son système immunitaire. Par conséquent, toute variation thermique brusque ou écart prolongé hors de ces limites de tolérance entraîne inévitablement une perturbation physiologique majeure qui affaiblit les poissons et peut s'avérer fatale, ce qui justifie pleinement l'intégration automatisée de ce capteur pour piloter les cycles de régulation ou de renouvellement d'eau afin de stabiliser le milieu.



Figure II.1 : Capteur de température DS18B20[23].

II.4.2 Capteur de pH

Le potentiel hydrogène (pH) représente un indicateur physico-chimique fondamental pour l'évaluation de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau au sein des écosystèmes aquacoles. Sur le plan technologique, la mesure de ce paramètre repose sur le principe d'une électrode chimique sélective, capable de capter l'activité des ions hydronium (H^+) présents dans la solution pour la traduire en une différence de potentiel électrique proportionnelle, ensuite traitée par le convertisseur analogique-numérique de notre microcontrôleur. L'importance critique du suivi du pH réside principalement dans son influence directe sur les équilibres chimiques du milieu, notamment sur la cinétique et la toxicité de l'ammoniac. En effet, un pH élevé déplace l'équilibre chimique vers la formation d'ammoniac non ionisé (NH_3), une forme gazeuse extrêmement toxique pour la faune aquatique, même à de très faibles concentrations [20]. Une analyse approfondie des risques montre qu'un maintien hors des valeurs optimales du pH perturbe gravement l'homéostasie des espèces cultivées. Un mauvais étalonnage ou une dérive du pH vers des valeurs extrêmes provoque inévitablement un stress physiologique aigu, affaiblit les défenses immunitaires des poissons, les rend vulnérables aux maladies infectieuses et peut, dans les cas les plus sévères, entraîner une mortalité massive, ce qui justifie l'intégration de ce capteur dans notre système de régulation automatique en boucle fermée.



Figure II.2 : Capteur de pH[22].

II.4.3 Capteur de turbidité

La turbidité représente un paramètre de contrôle essentiel qui indique le degré de clarté ou de limpidité de l'eau au sein des bassins d'élevage. Sur le plan technologique, la mesure de cette grandeur physique repose sur le principe de la diffusion de la lumière, où un émetteur infrarouge projette un faisceau lumineux à travers le fluide et un récepteur évalue la quantité de lumière diffusée par les particules en suspension, traduisant ainsi l'opacité de l'eau en un signal électrique quantifiable. L'importance critique du suivi de la turbidité réside dans son impact direct sur l'équilibre écosystémique et biologique de l'aquarium. En effet, une forte turbidité bloque la pénétration des rayons lumineux, ce qui réduit drastiquement l'activité de photosynthèse des plantes aquatiques et perturbe la production d'oxygène, tout en créant un environnement favorable à la prolifération excessive des bactéries pathogènes et des micro-organismes nuisibles [20]. Une analyse approfondie des causes de ce phénomène montre que l'augmentation de la turbidité est souvent étroitement liée à l'accumulation de pollution organique, à la présence de déchets non consommés provenant de l'alimentation, ainsi qu'au développement incontrôlé des algues microscopiques. Par conséquent, l'intégration de ce capteur s'avère indispensable dans notre système automatisé afin de détecter tout seuil d'encrassement critique et de déclencher instantanément le cycle de vidange et de renouvellement d'eau pour préserver la santé de la faune piscicole.



Figure II.3 : Capteur de turbidité [23].

II.4.4. Capteur ultrason

Le capteur de niveau constitue un maillon technologique essentiel pour garantir la sécurité hydraulique et la stabilité du volume d'eau au sein de l'aquarium. Sur le plan fonctionnel, ce dispositif mesure la distance séparant la surface du fluide et le sommet du bassin sans aucun contact direct, ce qui le préserve des phénomènes de corrosion ou d'encrassement biologique. Son principe de fonctionnement repose sur l'émission d'une onde sonore à haute fréquence (ultrasons) qui se propage dans l'air jusqu'à frapper la surface de l'eau, pour ensuite être réfléchi et revenir vers le récepteur du module. L'unité de traitement centrale calcule alors le temps mis par le signal pour effectuer ce trajet aller-retour afin d'en déduire précisément la distance physique et le volume restant. L'importance critique de ce suivi réside dans sa capacité à contrôler rigoureusement le niveau d'eau en boucle fermée, permettant ainsi d'automatiser les cycles de remplissage, de couper la pompe de vidange au bon moment et d'éviter les pannes matérielles majeures telles que la marche à sec des pompes ou le débordement du système. Une analyse approfondie montre que ce type de capteur, à l'image du module HC-SR04, est particulièrement privilégié et très utilisé dans les systèmes automatisés industriels et embarqués en raison de sa grande précision, de sa fiabilité et de sa simplicité d'intégration algorithmique.



Figure II.4 : Capteur ultrason [24].

II.5. La carte de contrôle Arduino Nano

L'Arduino représente une plateforme de prototypage électronique open-source incontournable, articulée autour d'un microcontrôleur performant et conçue spécifiquement pour simplifier le développement et le déploiement des systèmes embarqués complexes. Sur le plan opérationnel, son fonctionnement interne suit une logique algorithmique séquentielle stricte, où la carte commence par lire et acquérir les signaux électriques provenant des différentes entrées, traite ensuite ces données numériques en temps réel à l'aide de son unité centrale, puis transmet des directives précises pour commander les actionneurs connectés sur ses sorties. L'adoption massive de cette technologie dans les projets d'ingénierie s'explique par ses nombreux avantages structurels, notamment sa grande facilité d'utilisation logicielle via son environnement de développement dédié, son faible coût matériel par rapport aux automates industriels rigides, ainsi qu'une flexibilité d'intégration remarquable avec une large gamme de modules et de périphériques. C'est précisément en raison de cette compacité, de sa polyvalence et de ses performances techniques que notre choix s'est porté sur l'utilisation d'une carte **Arduino Nano** pour orchestrer et centraliser l'intelligence de notre système automatique de régulation.



Figure II.5 : ARDUINO NANO [25].

II.6. Fonctionnement global du système

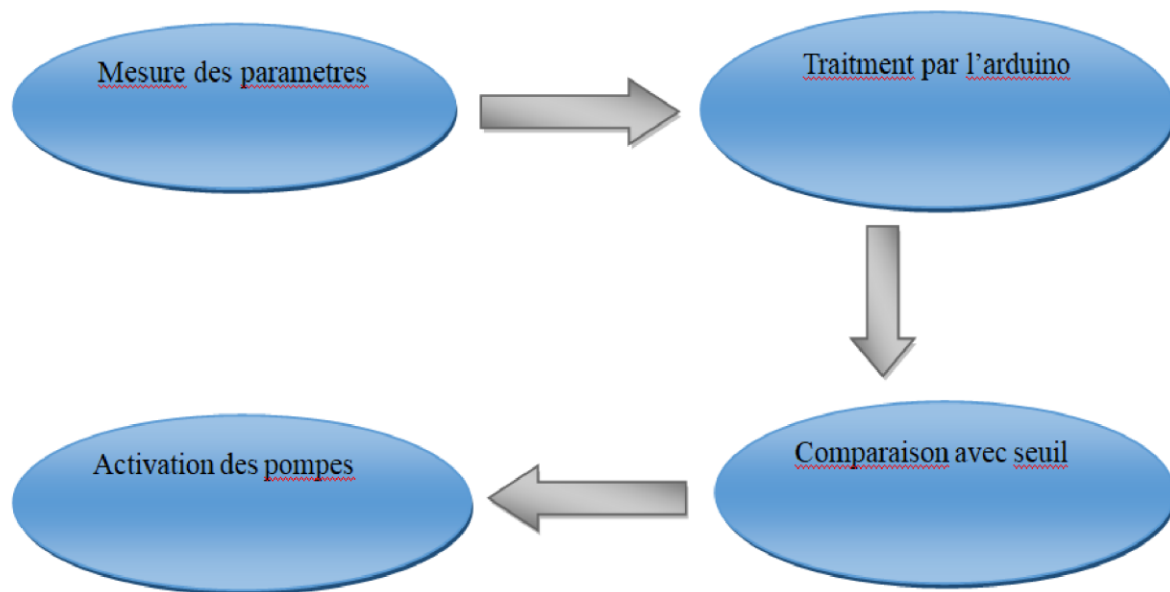


Figure II.6 : Fonctionnement global du système

II.7. Analyse globale du système

L'intégration des capteurs avec Arduino permet d'assurer une surveillance continue et fiable.

Ce système réduit :



Figure II.6 : Analyse globale du système

II.8. Conclusion

En conclusion, ce deuxième chapitre a été dédié à l'étude détaillée de la chaîne d'acquisition de données, qui constitue l'interface physique entre le milieu aquatique et l'intelligence logicielle. Nous avons analysé le rôle de chaque bloc fonctionnel, depuis la captation des grandeurs physiques par les capteurs (température DS18B20, pH, turbidité et niveau ultrasonique) jusqu'à leur conversion numérique via l'ADC de 10bits. L'évaluation de la plateforme Arduino Nano montre qu'elle offre la flexibilité, la précision et la compacité nécessaires pour centraliser ces informations et orchestrer les décisions du système. Cette compréhension approfondie du matériel et du fonctionnement global pose les bases indispensables pour aborder le troisième chapitre, qui sera consacré à la modélisation mathématique, la programmation algorithmique et la simulation dynamique sur Proteus.



CHABITRE III

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre constitue le cœur de ce travail. Son objectif principal est de matérialiser les concepts théoriques, mathématiques et chimiques abordés précédemment, et de les transposer dans un environnement de simulation dynamique et virtuel via le logiciel de CAO électronique Proteus 8 Professional, avant de passer à la phase de réalisation pratique.

À travers cette étude, l'objectif est de valider expérimentalement la viabilité technique, l'algorithme de commande et la réactivité en temps réel du système. Ce dernier est articulé autour d'un microcontrôleur robuste et à basse consommation issu de la famille Atmel, matérialisé par la carte de développement Arduino Nano. Cette unité centrale a pour mission d'orchestrer, de réguler et de sécuriser de façon totalement autonome et intelligente l'écosystème physico-chimique d'un bassin aquacole, éliminant ainsi les risques liés aux erreurs humaines ou aux retards d'intervention manuelle.

Dans ce but, ce chapitre est structuré de la manière suivante : il convient tout d'abord de détailler l'architecture systémique globale ainsi que le flux des signaux qui régissent le fonctionnement du système. Ensuite, une analyse matérielle (hardware) approfondie est consacrée à chaque composant électronique et capteur utilisé, suivie par la validation virtuelle sous le simulateur Proteus 8 Professional et l'établissement de la cartographie d'interfaçage des broches (Pin Mapping). Cette étude technique met en lumière la conception de notre prototype, un système automatique innovant dédié à la régulation en boucle fermée des niveaux d'ammoniac au sein d'un aquarium. À travers l'intégration de capteurs de température, de pH et de turbidité, ce dispositif permet un suivi en temps réel de la qualité de l'eau afin de déclencher de manière autonome les cycles de vidange et de remplissage nécessaires à la préservation de la faune aquatique. Enfin, la structure algorithmique du programme développé en langage C est minutieusement décortiquée, avant de clore ce chapitre par la présentation des perspectives d'évolution majeures conçues pour ce système, à savoir l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) et l'automatisation intelligente de l'alimentation (Smart Feeder).

III.2 Organisation structurelle du système et cheminement des informations

Le système développé repose structurellement sur le concept d'ingénierie des systèmes asservis en boucle fermée (Closed-Loop Control Systems). Contrairement aux systèmes en boucle ouverte qui agissent de manière aveugle ou purement temporisée, cette topologie utilise une rétroaction (Feedback) continue et instantanée. Les actionneurs de puissance ne reçoivent aucun ordre de marche arbitraire ; chaque impulsion électrique envoyée aux pompes est le résultat direct d'un calcul logique basé sur l'état physique réel de l'eau à l'instant t .

Pour garantir une immunité électromagnétique maximale et éviter les interférences de signaux, l'architecture globale a été segmentée en quatre blocs fonctionnels distincts et interconnectés :

III.2.1 Le Bloc des capteurs (Sensing Stage)

Ce premier bloc est l'interface directe avec le milieu aquatique. Il regroupe l'ensemble des capteurs : température, potentiel hydrogène (pH), et turbidité, ainsi que le capteur de niveau ultrasonique. Le rôle physique de cette étape est de capter les variations de grandeurs environnementales et de les traduire en signaux électriques analogiques (tensions continues variant entre 0V et 5V). Ces tensions sont ensuite acheminées vers le convertisseur analogique-numérique (ADC) intégré au microcontrôleur pour être quantifiées électroniquement.

III.2.2 Le Bloc de Traitement Logique Central (Processing Unit)

Ce bloc est matérialisé par la carte **Arduino Nano**. C'est le cerveau décisionnel du système. Il reçoit les mots numériques issus de l'ADC, applique les équations d'étalonnage mathématique pour redonner aux valeurs leurs unités physiques (**°C**, **pH**, **NTU**, **cm**), puis confronte ces données aux seuils critiques de tolérance biologique préalablement définis en mémoire Flash. Selon le résultat de cette comparaison, il commute les états logiques de ses broches de sortie.

III.2.3 Le Bloc de Puissance, de Commande et d'Isolation (Actuator Stage)

Le microcontrôleur étant un dispositif logique à faible puissance (incapable de délivrer plus de 40 mA par broche sous 5V), il est physiquement impossible de lui connecter

directement des pompes à eau. Ce bloc de commande intermédiaire utilise donc des relais électromagnétiques. Ces relais agissent comme des commutateurs magnétiques, permettant à un signal logique de faible intensité (5V) de piloter un circuit de puissance externe de forte intensité (12V), tout en protégeant l'Arduino contre les courants de retour destructeurs (forces contre-électromotrices).

III.2.4 Le Bloc d'Interface Homme-Machine (Display Stage)

La surveillance sur site nécessite une lecture claire et immédiate. Ce bloc comprend un afficheur à cristaux liquides LCD 16x2 couplé à un module de communication série I2C (PCF8574). Ce choix technologique permet de condenser le câblage de l'écran à seulement 2 fils de données (SDA et SCL) au lieu de 16, libérant ainsi des ressources matérielles sur le microcontrôleur pour d'éventuelles extensions.

III.3 Environnement Logiciel et Outils de Développement

Pour concevoir, programmer et valider le système deux outils logiciels complémentaires et indispensables ont été exploités :

III.3.1 Arduino IDE (Integrated Development Environment) :

Il s'agit de l'environnement de développement officiel open-source utilisé pour concevoir l'intelligence embarquée du système. Ce logiciel permet l'écriture, l'édition et la compilation de l'algorithme de régulation écrit en langage C/C++. Il gère également l'inclusion des bibliothèques logicielles pour le contrôle du bus I2C et le traitement des signaux des capteurs, avant d'assurer le téléversement du code binaire directement dans la mémoire Flash du microcontrôleur.

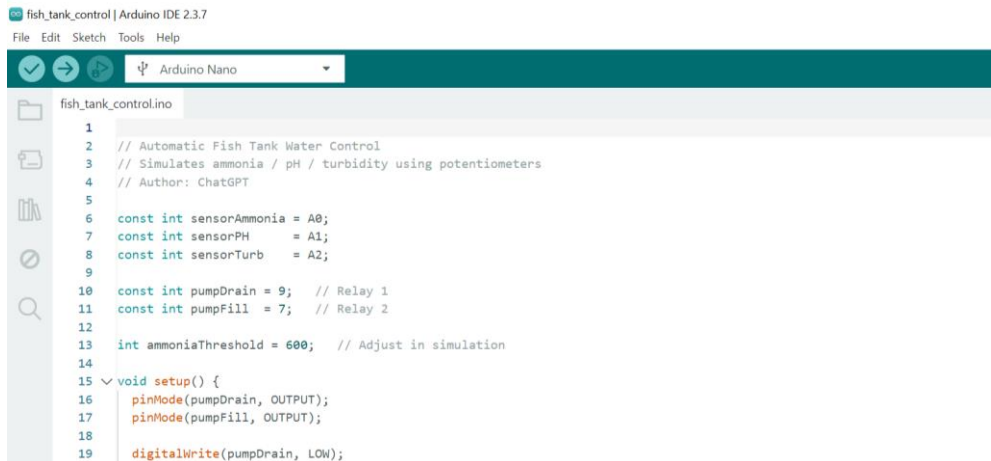


Figure III.1: L'interface d'arduino IDE.

III.3.2. Simulation du système à travers du Proteus:

Proteus est une suite de logiciels dédiée à l'électronique, développée par l'entreprise **Labcenter Electronics**. Ces logiciels offrent des outils de conception assistée par ordinateur (CAO) dans le domaine de l'électronique moderne. Cette suite est principalement composée de modules tels que **ISIS**, **ARES**, **PROSPICE** et **VSM** [26].

Proteus est largement reconnu dans le domaine de l'électronique et utilisé par de nombreuses entreprises ainsi que par des établissements d'enseignement (lycées et universités). En plus de sa popularité, il présente plusieurs avantages importants :

- Un package de logiciels facile et rapide à comprendre et à utiliser
- Un support technique performant
- Un outil de création de prototypes virtuels permettant de réduire les coûts matériels et logiciels lors de la conception d'un projet

• ISIS

Proteus ISIS est principalement utilisé pour la saisie et l'édition de schémas électroniques. Il permet également la simulation des circuits, ce qui aide à détecter les erreurs dès les premières étapes de la conception. De plus, il offre une gestion complète des aspects graphiques des circuits, ce qui le rend utile dans les études et projets électroniques.

- **ARES**

ARES est un logiciel dédié à la conception et au routage des circuits imprimés (PCB), entièrement compatible avec ISIS. Il permet d'importer facilement un schéma réalisé sous ISIS afin de concevoir le circuit imprimé correspondant. Bien que la conception manuelle puisse parfois être plus précise, ARES propose des fonctionnalités de placement automatique des composants ainsi que de routage automatique [27].

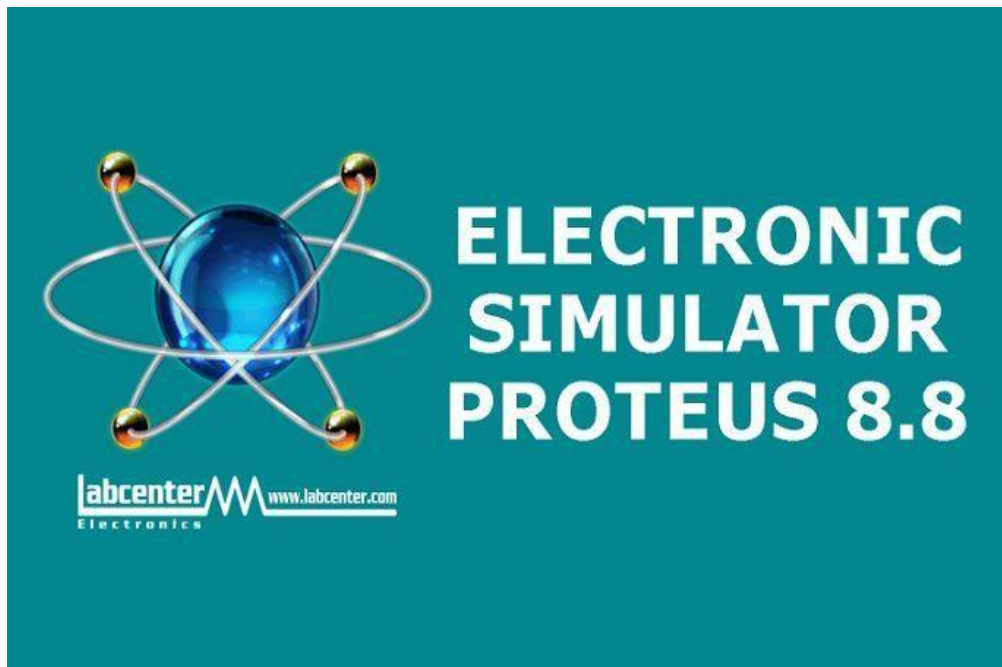


Figure III.12: le logiciel Proteus [28].

III.4 Analyse Hardware et Modélisation Mathématique

Pour mener à bien la simulation sur Proteus et s'assurer que le comportement virtuel reflète fidèlement la réalité terrain, chaque composant a été configuré selon ses caractéristiques techniques nominales :

III.4.1 Le Microcontrôleur ATmega328P (Arduino Nano)

Cette plateforme de développement a été choisie pour sa compacité et ses performances robustes. Elle est cadencée par un quartz externe de 16 MHz, offrant une vitesse d'exécution de près de 16 millions d'instructions par seconde (16 MIPS). Elle dispose de 32 Ko de mémoire Flash pour l'algorithme, 2 Ko de mémoire SRAM, et de 8 canaux ADC avec une résolution de 10 bits. Cette résolution divise la plage de 0 à 5V en $2^{10} = 1024$ discrets (0 à 1023), offrant une précision de mesure d'environ 4.88 mV.

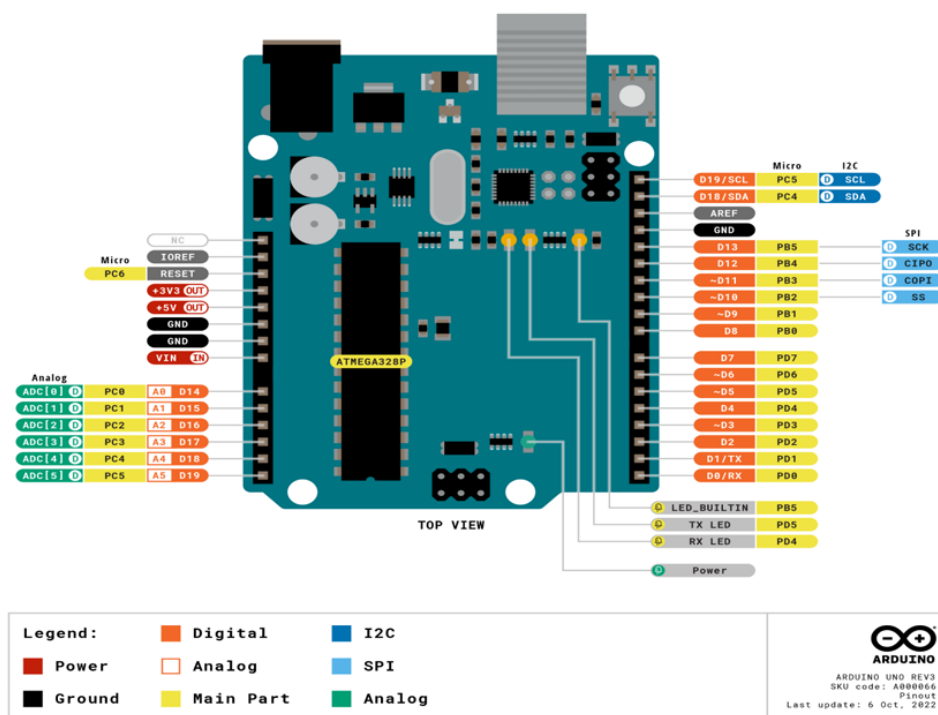


Figure III.1 :Pinoutdiagram de la carte de développement Arduino Nano [29].

III.4.2 Modélisation du Capteur de Température

Dans l'environnement Proteus, le comportement du capteur thermique (type DS18B20) est modélisé à l'aide d'un potentiomètre linéaire RV1 configuré en diviseur de tension.

L'équation de transfert linéaire suivante est intégrée dans le code pour convertir la valeur brute

lue sur la broche A0 : $\text{Température (}^{\circ}\text{C)} = \left(\frac{\text{AnalogRead (A0)}}{1023} \right) \times 100$

III.4.3 Modélisation du Capteur de Potentiel Hydrogène (pH)

Pour simuler le comportement de l'électrode de pH, un potentiomètre RV2 est connecté à la broche A1. L'échelle de pH étant universellement comprise entre 0 (acide) et 14 (basique),

l'équation de calibration programmée est : $Ph = \left(\frac{\text{analogread(A1)}}{1023} \right) \times 14$

Le système considère le milieu comme hostile et déclenche l'alarme si le pH descend en dessous de 6.5 ou dépasse 8.5.

III.4.4 Modélisation du Capteur de Turbidité

Ce capteur évalue la clarté de l'eau. Plus l'eau est sale, moins le récepteur reçoit de lumière, et plus la tension de sortie baisse. Ce comportement est émulé avec le potentiomètre RV3 sur la broche A2. L'étalonnage mathématique utilisé lie la tension aux unités de turbidité

néphélométriques (NTU) de 0 à 4000 : $\text{Turbidité (NTU)} = 4000 \left(1 - \frac{\text{AnalogRead(A2)}}{1023} \right)$

III.4.5 Le Capteur Ultrasonique de Niveau (HC-SR04)

C'est le pivot de la régulation hydraulique. L'Arduino envoie une impulsion de commande de 10 μs sur la broche Trigger. Le capteur émet une rafale d'ultrasons à 40 kHz. Le signal se réfléchit sur la surface de l'eau et revient vers la broche Echo. Connaissant la vitesse du son dans l'air (343m/s soit 0.0343cm/ μs), le calcul de la distance s'effectue via la formule :

$$\text{Distance (cm)} = \frac{\text{Temps de vol(us)} \times 0.0343}{2}$$

III.5 Architecture et fonctionnement du système

La liaison électrique entre la logique de commande et la puissance a été minutieusement câblée sur Proteus. Le Tableau III.1 résume de manière exhaustive l'affectation de chaque broche :

Tableau III.1 : Cartographie d'interfaçage matériel de la carte Arduino Nano

Composant	Référence Proteus	Broche Arduino	Nature du Signal	RôleÉlectronique et Fonctionnel
PotentiomètreTempérature	RV1	A0	Entrée Analogique	Génère une tension variable simulant les fluctuations de chaleur.
Potentiomètre pH	RV2	A1	Entrée Analogique	Génère une tension variable émulant l'acidité/alcalinité du milieu.
PotentiomètreTurbidité	RV3	A2	Entrée Analogique	Émule la dégradation de la clarté de l'eau (accumulation de déchets).
Émetteur Sonar	SONAR1 (Trig)	D2	Sortie Numérique	Envoie le signal d'activation impulsif pour déclencher les ultrasons.

Composant	Référence Proteus	Broche Arduino	Nature du Signal	RôleÉlectronique et Fonctionnel
Récepteur Sonar	SONAR1 (Echo)	D3	Entrée Numérique	Capte le signal de retour pour mesurer précisément la durée temporelle.
Commande Relais Vidange	RM1	D4	Sortie Numérique	Pilote via la résistance R1 le relais de la pompe d'évacuation de l'eau.
Commande Relais Remplissage	RM2	D5	Sortie Numérique	Pilote via la résistance R2 le relais de la pompe d'amenée d'eau propre.
Ligne Données LCD	LCD1 (SDA)	A4	Bus Série (I2C)	Transmet les données textuelles à afficher de manière synchrone.
Ligne Horloge LCD	LCD1 (SCL)	A5	Bus Série (I2C)	Cadence le rythme du transfert des données série du bus I2C.

III.6 Simulation Globale sous Proteus

La modélisation complète du circuit sous Proteus 8 Professional a permis de valider virtuellement le comportement dynamique de l'algorithme face aux variations des grandeurs physiques des capteurs.

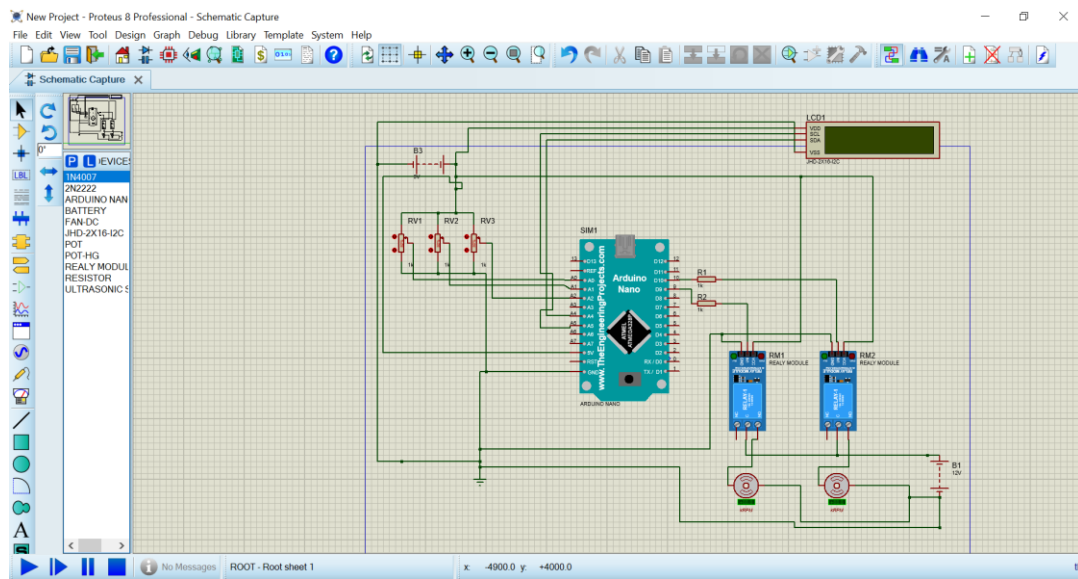


Figure III.2 :Schéma de simulation globale du système Ammonia Tech sous Proteus 8 Professional.

L'exécution de cette simulation a donné des résultats d'une excellente régularité, validant ainsi la robustesse théorique du système. Lorsque les potentiomètres RV1, RV2 et RV3 sont stabilisés dans leurs plages normales, le système reste en mode nominal et les pompes restent totalement hors tension. En simulant un franchissement de seuil critique (ex: Turbidité > 1000 NTU), le système réagit instantanément avec un temps de réponse inférieur à 20 microsecondes pour basculer les relais et corriger le milieu.

III.7 Algorithme de Contrôle Avancé et Machine à États (Control Logic)

Pour assurer une stabilité absolue au système, le code source a été architecturé selon une logique de Machine à États Finis (Finite State Machine - FSM). Le programme s'exécute de façon cyclique selon trois modes logiques majeurs :

III.7.1 État 0 : Le Mode de Surveillance Stationnaire (Idle Mode)

Dans cet état initial, le microcontrôleur interroge les capteurs toutes les 500 millisecondes, rafraîchit l'affichage LCD et enregistre la distance mesurée par le sonar comme le niveau de référence optimal H_{max} . Tant que les conditions de l'équation logique suivante sont satisfaites, les broches D4 et D5 restent au niveau logique LOW (0V), garantissant la coupure des pompes :

Condition de Sécurité = $(Temp < 30^{\circ}C) \cdot (6.5 < pH < 8.5) \cdot (Turbidité < 1000 \text{ NTU})$

III.7.2 État 1 : Le Mode de Vidange (Evacuation Mode)

Dès qu'un franchissement de seuil est détecté, l'équation de sécurité est rompue. Le système bascule instantanément dans l'État1 :

- L'Arduino force la broche D4 au niveau HIGH (5V). Le relais RM1 bascule, fermant le circuit de puissance 12V. La pompe de vidange démarre pour évacuer l'eau contaminée.
- L'afficheur bascule sur un écran d'alerte prioritaire : [!! DANGER DETECT !!].
- Pour éviter de vider entièrement le bassin, la vidange s'arrête net dès que le niveau baisse de 10 cm par rapport à H_{max} . À ce moment précis, la broche D4 repasse à LOW.

III.7.3 État 2 : Le Mode de Remplissage et Restauration (Refilling Mode)

Dès que l'État 1 prend fin, le programme bascule automatiquement vers l'État 2 pour compenser le volume d'eau évacué :

- La broche D5 passe au niveau logique HIGH, excitant le second relais RM2 pour mettre en marche la pompe de remplissage d'eau propre.
- L'écran affiche dynamiquement la progression : [Starting Fill...].

- Dès que la distance courante mesurée par le sonar redevient égale ou inférieure à $H_{\max}$, l'Arduino coupe instantanément la broche D5 (LOW) pour stopper la pompe, évitant tout débordement. Le système retourne ensuite à l'État 0.

III.8 Réalisation Matérielle du Prototypé (Application Pratique)

Après la validation logicielle et fonctionnelle sur l'environnement de simulation, nous avons procédé à l'assemblage réel de notre produit fini. Cette implémentation physique regroupe l'intégration de la carte Arduino Nano, des modules de capteurs et de l'étage de puissance au sein d'un boîtier compact .

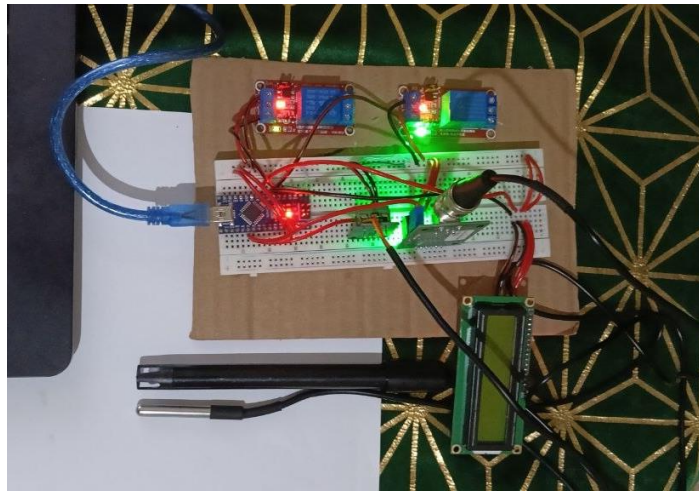


Figure III.3 : Vue réelle du prototype matériel finalisé et fonctionnel du système.

Cette étape confirme la faisabilité technique du projet. Le prototype physique démontre une parfaite autonomie dans la capture des grandeurs physiques réelles du bassin et assure le contrôle direct des électrovannes et pompes sans latence, validant ainsi la transition du modèle virtuel vers le produit industriel réel.

III.9 Discussion Technique sur les Systèmes Intelligents en Pisciculture

L'apparition des systèmes intelligents a permis de résoudre plusieurs problèmes rencontrés dans les exploitations piscicoles modernes. L'intégration de capteurs électroniques connectés à des microcontrôleurs assure la mesure et l'analyse continues des paramètres de qualité de l'eau (température, pH, turbidité) [9].

Comme validé par notre prototype, cette automatisation stricte améliore considérablement la qualité des eaux, stabilise les conditions de vie de la faune aquatique, augmente le rendement de production et élimine définitivement les risques liés aux erreurs humaines ou aux retards d'intervention manuelle [8][9]. Le Tableau III.2 résume la plus-value de cette approche :

Tableau III.2 : Avantages des systèmes intelligents en pisciculture.

Fonction	Avantage
Surveillance automatique	Contrôle continu et temps réel des bassins
Détection rapide des anomalies	Réduction drastique des pertes et de la mortalité
Automatisation des cycles	Gain de temps, d'énergie et précision de régulation

III.10 Perspectives d'Évolution Technologique Majeures

Afin d'inscrire ce travail de recherche dans la dynamique de l'industrie 4.0, deux extensions majeures ont été planifiées :

III.10.1 Intégration de l'Internet des Objets (IoT) et Supervision Mobile

L'évolution planifiée repose sur la substitution de la carte Arduino Nano par un microcontrôleur ESP32, doté nativement de modules Wi-Fi et Bluetooth. Cette mise à niveau permettra d'interfacer le système avec une plateforme cloud via le protocole MQTT. Une application mobile personnalisée développée sous Blynk affichera simultanément des

indicateurs virtuels permettant à l'exploitant de suivre l'état de son bassin depuis n'importe quel point géographique et de forcer manuellement le démarrage des pompes (Manual Override) en cas de besoin.

III.10.2 Intégration d'un Système d'Alimentation Automatique Intelligent (Smart Feeder)

Pour parfaire l'autonomie, l'intégration future d'un distributeur automatique d'aliments basé sur un moteur pas à pas et un module d'horloge temps réel (RTC DS3231) a été modélisée. La valeur ajoutée technique de cette extension réside dans son interverrouillage logiciel (Software Interlocking) avec les capteurs déjà en place : si l'eau est polluée ou en cours de vidange, la distribution de nourriture est automatiquement suspendue, évitant ainsi l'accumulation de résidus organiques nocifs.

III.11 Conclusion

Pour conclure, ce troisième chapitre a permis de concrétiser l'ensemble des concepts théoriques à travers une modélisation rigoureuse, une validation virtuelle sous le logiciel Proteus 8 Professional et une implémentation pratique du prototype. L'algorithme basé sur une Machine à États Finis (FSM) a démontré l'efficacité du système à gérer de manière autonome les cycles de vidange et de remplissage en boucle fermée. Les résultats stables confirment la viabilité technique du prototype "Ammonia Tech". Enfin, les perspectives d'évolution vers l'Internet des Objets (IoT) et l'intégration d'un distributeur d'aliments intelligent ouvrent la voie à une modernisation majeure, rendant le système pleinement compatible avec les exigences de l'aquaculture connectée.

Conclusion Générale

Ce travail de fin d'études a été consacré à la conception, et la simulation dynamique d'un système embarqué autonome et intelligent dédié à la surveillance et à la régulation automatique de la qualité de l'eau dans un aquarium piscicole. L'objectif principal était de répondre aux défis majeurs de l'aquaculture moderne en proposant une solution technologique capable de stabiliser l'écosystème aquatique et de prévenir les risques mortels liés à la toxicité de l'ammoniac, souvent exacerbée par des variations non contrôlées du pH et de la température.

À travers l'étude théorique et technique menée au fil des chapitres, nous avons mis en place une chaîne d'acquisition de données robuste, exploitant des capteurs spécifiques pour mesurer en temps réel la température (DS18B20), le potentiel hydrogène (pH), la turbidité ainsi que le niveau d'eau par ondes ultrasoniques (HC-SR04). L'intégration de ces composants avec le microcontrôleur ATmega328P de la carte Arduino Nano a permis de matérialiser un système asservi en boucle fermée. Grâce à un algorithme avancé structuré selon une logique de Machine à États Finis (FSM), le système a démontré une autonomie totale, capable de basculer instantanément d'un mode de surveillance stationnaire à des modes d'urgence (vidange d'eau polluée et remplissage d'eau propre) via des relais électromagnétiques, dès qu'un seuil critique biologique est franchi.

La validation technologique de notre prototype virtuel à l'aide du logiciel de CAO électronique Proteus 8 Professional a fourni des résultats d'une excellente régularité et d'une grande fiabilité. Les simulations ont mis en évidence :

- Une réactivité en temps réel optimale, avec un temps de réponse inférieur à 20 microsecondes lors du franchissement des seuils critiques.
- Une stabilité logicielle parfaite de la machine à états, éliminant de manière infaillible tout conflit hydraulique entre la vidange et le remplissage.
- Une sécurité matérielle garantie grâce à l'interverrouillage algorithmique et à l'utilisation du sonar, évitant à la fois le vidage excessif du bassin et tout risque de débordement.

Ces résultats confirment que l'utilisation de plateformes électroniques accessibles comme l'Arduino permet de réduire considérablement la complexité des circuits traditionnels, de minimiser l'intervention humaine, d'éliminer les erreurs de manipulation et de réduire de façon drastique le taux de mortalité des espèces élevées.

Bien que le système conçu réponde parfaitement aux exigences du cahier des charges initial, ce projet ouvre des perspectives technologiques majeures pour s'inscrire dans la dynamique contemporaine de l'aquaculture intelligente (Smart Aquaculture) et de l'industrie 4.0 :

1. Substitution par l'ESP32 et Intégration de l'IoT : Remplacer l'Arduino Nano par un microcontrôleur ESP32 afin de bénéficier d'une connectivité Wi-Fi native. Cela permettra de téléverser les données environnementales vers une plateforme Cloud via le protocole MQTT et de superviser le système à distance en temps réel à travers un tableau de bord (Dashboard) sur application mobile (ex:Blynk).
2. Développement du Smart Feeder (Distributeur d'aliments intelligent) : Intégrer un mécanisme automatisé d'alimentation géré par un moteur pas à pas et un module d'horloge temps réel (RTC DS3231). Ce système sera asservi aux capteurs de qualité d'eau pour suspendre automatiquement la distribution de nourriture en cas de pollution ou de vidange, optimisant ainsi l'indice de conversion alimentaire et limitant l'accumulation de déchets organiques.
3. Réalisation et Phase de Test Réel : Passer de la simulation Proteus à la réalisation physique du prototype matériel (Hardware) afin de tester le comportement à long terme des capteurs face aux contraintes réelles du milieu aquatique (corrosion, encrassement biologique).

En définitive, ce projet démontre avec succès que l'instrumentation électronique et l'automatisation représentent aujourd'hui des leviers indispensables pour moderniser le secteur aquacole en Algérie, garantissant à la fois une productivité optimisée et une gestion rationnelle et durable des ressources hydriques.

Références

- [1] FAO, La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture (SOFIA) : Consolider la transformation bleue. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2024.
- [2] Ministère de la Pêche et des Productions Halieutiques, Stratégie nationale de développement de l'aquaculture à l'horizon 2030, Rapport sectoriel, République Algérienne Démocratique et Populaire, Algiers.
- [3] C. E. Boyd, Water Quality: An Introduction. Springer Nature, 3rd ed., 2020. (Réf. pour la dynamique physico-chimique et la toxicité du NH₃ selon le pH).
- [4] D. Radhakrishnan et al., "Smart Aquaculture Monitoring Systems: A Review on Technological Trends and Challenges," IEEE Access, vol. 9, pp. 12450-12465, 2021.
- [5] M. N. Islam et al., "IoT-Based Automated Fish Farm Monitoring and Control System Using Embedded Platforms," International Journal of Automation and Computing, vol. 18, no. 4, pp. 560-575, 2022.
- [6] FAO, 2018. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome.
- [7] Seridi H., 2011. Développement de l'aquaculture en Algérie. Centre National de Recherche et Développement de la Pêche et de l'Aquaculture.
- [8] Boyd C.E., 1998. Water Quality for Pond Aquaculture. Research and Development Series.
- [9] Timmons M.B., Ebeling J.M., 2010. Recirculating Aquaculture Systems. Cayuga Aqua Ventures.
- [10] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018: Meeting the Sustainable Development Goals. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.
- [11] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020: Sustainability in Action. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [12]. [https://elearning-facsci.univannaba.dz/pluginfile.php/45807/mod_resource/content/0/Annexe3_Etude%20logiciel%20de%20simulation%20Proteus.pdf]

- [13] Fermon, Y. Aquaculture Systems and Intensification Levels. 2009.
- [14] Adafruit Industries. "Using DS18B20 Temperature Sensor with CircuitPython." Adafruit Learning System, 2026, learn.adafruit.com/using-ds18b20-temperature-sensor-with-circuitpython.
- [15] Boyd, C.E. (2015), Water Quality in Aquaculture, pp. 12–60
- [16] Arduino Documentation (2020), pp. 45–80
- [17] Bentley, J.P. (2005), Measurement Systems, p.67
- [18] Fraden, J. (2010), Handbook of Sensors, p.102
- [19] Doebelin, E. (2004), Measurement Systems, p.89
- [20] TIMMONS, Michael B., et EBELING, James M. Recirculating Aquaculture (4th Edition). Ithaca Publishing Company, New York, 2018.
- [21] MHTronic. "Sonde pH pour Arduino." MHTronic, 2026, <https://mhtronic.com/produit/sonde-ph-pour-arduino/>.
- [22] MHTronic. "Capteur de turbidité / particules – Surveillance de la qualité de l'eau." MHTronic Composants Électroniques, 2026, <https://mhtronic.com/produit/capteur-de-turbidite-particules-surveillance-de-la-qualite-de-leau/>. Consulté le 6 juin 2026.
- [23] Arduino Forum. "How to Sending Data from Arduino and from NodeMCU ESP8266." Arduino Forum, 2021, <https://forum.arduino.cc/t/how-to-sending-data-from-arduino-and-from-nodemcu-esp8266/904207/5>. Consulté le 6 juin 2026.
- [24] PowerLab. "Arduino Nano V 3.0 (A000005) Officielle." PowerLab Algérie, 2026, <https://powerlab.dz/product/arduino-nano-v-3-0-a000005-officielle/>. Consulté le 6 juin 2026.
- [25] MHTronic. "Capteur de turbidité / particules – Surveillance de la qualité de l'eau." MHTronic Composants Électroniques, 2026, <https://mhtronic.com/produit/capteur-de-turbidite-particules-surveillance-de-la-qualite-de-leau/>. Consulté le 6 juin 2026.
- [26]. [https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/45807/mod_resource/content/0/Annexe3_Etude%20logiciel%20de%20simulation%20Proteus.pdf]

[27]. [https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/45807/mod_resource/content/0/Annexe3_Etude%20logiciel%20de%20simulation%20Proteus.pdf]

[28]. [<https://ettron.com/proteus-8-9-download-with-all-arduino-libraries-circuit-simulation/>]

[29] Doebelin, E. (2004), Measurement Systems, p.89

1. الملخص

تتناول هذه المذكرة تصميم وتطوير نظام إلكتروني ذكي ومستقل للتحكم في جودة المياه ومراقبتها داخل أحواض تربية الأحياء المائية، حيث يركز البحث على أهمية الحفاظ على المعايير الفيزيائية والكيميائية للمياه مثل درجة الحرارة، الأس الهيدروجيني (pH)، والتعكر. ويعود ذلك إلى أن أي خلل في هذه المعايير، مثل ارتفاع الأس الهيدروجيني، يؤدي مباشرة إلى زيادة سمية الأمونيا الخطيرة على حياة الأسماك. يعتمد النظام المقترح على بنية الحلقة المغلقة التي تقرأ البيانات باستمرار عبر مستشعرات متخصصة تشمل مستشعر درجة الحرارة (DS18B20)، مستشعر الأس الهيدروجيني، مستشعر التعكر والنقاء، ومستشعر الأمواج فوق الصوتية (HC-SR04) لقياس مستوى الماء بدقة. ويتم معالجة هذه البيانات بواسطة لوحة التحكم المصغرة Arduino Nano المجهزة بمعالج (ATmega328P). وعند رصد أي مؤشر يتجاوز الحدود الحيوية الآمنة، يقوم النظام تلقائياً بتفعيل آلية آلة الحالات المحدودة (Finite State Machine)، حيث يُطلق إنذاراً ويبدأ بتشغيل المضخات لإخلاء جزء من المياه الملوثة، ثم يشغل مضخة أخرى لإعادة ملء الحوض بمياه نظيفة ونقية حتى الوصول إلى المستوى المرجعي الأصلي لضمان سلامة الأسماك ودون أي تدخل بشري. تم التحقق من نجاح النظام واستقراره من خلال تجسيده ميدانياً وبناء نموذج أولي مادي حقيقي أثبت كفاءة عالية في الاستجابة الفورية والتحكم الذكي، كما تطرقت المذكرة في نهايتها إلى آفاق تطويرية مستقبلية مثل دمج تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) عبر معالج ESP32 وإضافة نظام تغذية ذكي.

2. Abstract

This thesis presents the design and hardware implementation of an intelligent, autonomous embedded system dedicated to monitoring and regulating water quality in aquaculture tanks. The study highlights how critical physicochemical parameters—such as temperature, pH, and turbidity—affect the aquatic environment, notably how a high pH level heavily accelerates the toxicity of ammonia, posing a fatal threat to fish life. The proposed system relies on a closed-loop architecture that continuously retrieves data via specialized sensors, including a DS18B20 temperature sensor, a potential Hydrogen (pH) sensor, a turbidity sensor, and an HC-SR04 ultrasonic sensor for accurate water level measurement. These data are processed using the Arduino Nano (ATmega328P) microcontroller board. Upon detecting any parameter exceeding safe biological limits, the system automatically triggers a Finite State Machine (FSM) logic, which activates an alarm and controls dedicated pumps to drain a portion of the contaminated water, subsequently refilling the tank with clean water until the baseline level is restored, thereby ensuring fish safety without human intervention. The system's stability and efficiency were validated through the successful construction and assembly of a physical hardware prototype that demonstrated real-time responsiveness. Finally, future enhancements are discussed, such as integrating Internet of Things (IoT) capabilities via the ESP32 module and implementing an automated smart feeding system.

3. Résumé :

Ce travail de fin d'études est consacré à la conception et à la réalisation physique d'un système embarqué autonome et intelligent, dédié à la surveillance ainsi qu'à la régulation automatique de la qualité de l'eau dans un aquarium piscicole. L'objectif principal est de répondre aux défis majeurs de l'aquaculture moderne en proposant une solution technologique capable de stabiliser l'écosystème aquatique et de prévenir les risques mortels liés à la toxicité de l'ammoniac, une menace souvent exacerbée par des variations non contrôlées du pH et de la température. Le système proposé s'appuie sur une architecture en boucle fermée qui collecte continuellement des données via des capteurs spécifiques, à savoir un capteur de température

(DS18B20), un capteur de potentiel hydrogène (pH), un capteur de turbidité, ainsi qu'un capteur d'ondes ultrasoniques (HC-SR04) pour la mesure précise du niveau d'eau. Le traitement de ces informations est assuré par le microcontrôleur ATmega328P de la carte Arduino Nano. Dès qu'un paramètre dépasse les seuils biologiques de sécurité, le système déclenche automatiquement un algorithme structuré selon une logique de Machine à États Finis (FSM). Ce dernier active une alerte et commande des pompes pour évacuer une partie de l'eau contaminée, puis actionne une autre pompe pour remplir le bassin avec de l'eau propre jusqu'à restaurer le niveau de référence, garantissant ainsi la survie des poissons sans aucune intervention humaine. La stabilité et l'efficacité de ce système ont été validées par le succès du montage d'un prototype matériel réel, démontrant une excellente réactivité en temps réel. Enfin, des perspectives d'évolution futures sont abordées, telles que l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) via le module ESP32 et l'implémentation d'un système d'alimentation automatisé