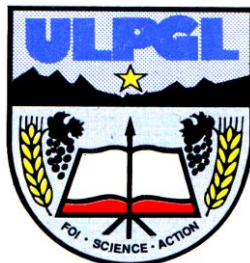


UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

DOMAINE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIÈRE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN
INCUBATEUR A OEUF AUTOMATIQUE A
ALIMENTATION MULTI SOURCE ET SUIVI A
DISTANCE VIA UNE APPLICATION WEB**

Par **MUSAMBA KABWARO GLORIA**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Bachelor en Sciences de l'Ingénieur

Mention : Génie Electrique et Informatique

Directeur : Prof. BARAKA MUSHAGE Olivier

Encadreur : Ir. Johnson KISAMBA

ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« Ce que nous savons est une goutte d'eau, ce que nous ignorons est un océan... »

Isaac NEWTON

Dédicace

A mes parents, dont l'amour, les sacrifices et le soutien indéfectible ont rendu possible l'accomplissement de ce travail.

Remerciements

Nous rendons grâce à l'Éternel Dieu Tout-Puissant pour la vie, la force et la grâce qu'il nous a accordées tout au long de notre parcours académique et pour l'aboutissement de ce travail.

Nos sincères remerciements vont également aux autorités académiques de l'ULPGL, et plus particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et Technologies, Département de Génie Électrique et Informatique, pour l'encadrement et la formation reçus tout au long de notre cursus.

Nous exprimons notre profonde gratitude au Professeur BARAKA MUSHAGE Olivier, qui a accepté de diriger ce travail avec bienveillance et rigueur scientifique, ainsi qu'à Monsieur Johnson KISAMBA pour son encadrement et son suivi constant.

Nos remerciements s'adressent également à nos amis et proches qui ont contribué, de près ou de loin, à l'atteinte de nos objectifs : Josaphat KATSWERE, Jeanine VAKATSURAKI, Martin KABWARO, Balkis KABWARO et Jorim VAKATSURAKI.

Que nos ami(e)s Happy, Lydie et Kevin reçoivent l'expression de notre gratitude pour leur précieux accompagnement.

Nos remerciements vont également à l'Église CBCA KESHERO ainsi qu'au Ministère de la JEM pour leur soutien inestimable.

Nous ne saurions terminer sans remercier l'ensemble de nos camarades étudiants pour leur collaboration fraternelle et leur esprit de solidarité.

Que toutes les personnes non citées nominativement ne se sentent pas oubliées ; qu'elles trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour leur contribution.

MUSAMBA KABWARO GLORIA

Résumé

Ce travail porte sur la conception et la réalisation d'un incubateur à œufs automatique avec alimentation multi source et suivi à distance via une application web. Il s'inscrit dans un contexte marqué par l'instabilité de l'alimentation électrique dans la ville de Goma, laquelle constitue une contrainte majeure pour la réussite de l'incubation artificielle. L'objectif principal est de réaliser un système capable de surveiller et de maintenir automatiquement les paramètres essentiels d'incubation, notamment la température, l'humidité, la ventilation et le retournement des œufs, tout en assurant la continuité de son fonctionnement grâce à une batterie de secours. Pour atteindre cet objectif, une démarche fondée sur l'analyse des besoins, la conception de l'architecture du système, la simulation de la partie embarquée et la réalisation d'un prototype a été adoptée. Le système réalisé intègre un microcontrôleur ESP32, un capteur de température et d'humidité DHT22, un dispositif de chauffage, un ventilateur et un mécanisme de retournement automatique des œufs. Il comprend également une application web permettant de consulter à distance les principaux paramètres de fonctionnement. Le chauffage est activé lorsque la température est inférieure à 37,5 °C et désactivé à partir de 38 °C. Une alerte est déclenchée lorsque l'humidité est inférieure à 40 % ou supérieure à 75 %. Le retournement des œufs s'effectue automatiquement toutes les deux heures et s'arrête au dix-huitième jour du cycle d'incubation. Les essais fonctionnels réalisés ont permis de vérifier la mesure de la température et de l'humidité, la commande des différents actionneurs ainsi que la consultation à distance des données. Les résultats obtenus montrent la faisabilité de la solution proposée et l'intérêt de combiner l'automatisation, une alimentation de secours et une supervision à distance afin d'améliorer la fiabilité et la continuité du processus d'incubation artificielle.

Mots-clés : incubateur automatique, incubation artificielle, alimentation de secours, ESP32, application web, supervision à distance.

Abstract

This work focuses on the design and implementation of an automatic egg incubator equipped with a backup power supply and remote monitoring through a web application. It addresses the instability of the electricity supply in the city of Goma, which constitutes a major constraint on the success of artificial incubation. The main objective is to develop a system capable of automatically monitoring and maintaining the essential incubation parameters, including temperature, humidity, ventilation, and egg turning, while ensuring continuous operation through a backup battery. To achieve this objective, an approach based on requirements analysis, system architecture design, embedded system simulation, and prototype implementation was adopted. The developed system integrates an ESP32 microcontroller, a DHT22 temperature and humidity sensor, a heating device, a fan, and an automatic egg-turning mechanism. It also includes a web application that enables remote monitoring of the main operating parameters. The heating system is activated when the temperature falls below 37.5 °C and deactivated when it reaches 38 °C. An alert is triggered when the humidity level falls below 40% or exceeds 75%. The eggs are automatically turned every two hours, and this process stops on the eighteenth day of the incubation cycle. The functional tests carried out made it possible to verify temperature and humidity measurement, actuator control, and remote data monitoring. The results demonstrate the feasibility of the proposed solution and the relevance of combining automation, a backup power supply, and remote monitoring to improve the reliability and continuity of the artificial incubation process.

Keywords: automatic incubator, artificial incubation, backup power supply, ESP32, web application, remote monitoring.

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des abréviations	x
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
Introduction générale	1
0.1. Contexte	1
0.2. Identification et formulation du problème	2
0.3. Questions de recherche	2
0.4. Formulation des hypothèses.....	2
0.5. Justification du choix du sujet et motivations.....	3
0.5.1. Motivation et intérêt du sujet	3
0.5.2. Pertinence sociale du sujet	3
0.6. Énoncé des objectifs de recherche	4
0.6.1. L'objectif général.....	4
0.6.2. Objectifs spécifiques	4
0.7. Méthodologie et délimitation du travail.....	4
0.7.1. Méthodologie	4
0.7.2. Délimitation du travail	5
0.8. Structure du mémoire.....	5

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes d'incubations	6
1.1 Généralités sur l'aviculture et l'incubation artificielle	6
1.1.1 Notions générales sur l'aviculture	6
1.1.2 Incubation naturelle vs incubation artificielle.....	7
1.2 Principe de fonctionnement d'un incubateur artificiel.....	9
1.2.1 Paramètres critiques d'incubation.....	9
1.2.2 Architecture générale d'un incubateur.....	10
1.3 Systèmes d'alimentation électrique	12
1.3.1 Alimentation par secteur (réseau électrique) [10].....	12
1.3.2 Alimentation par source photovoltaïque [11]	13
1.3.3 Systèmes hybrides / multi-source / avec source de secours.....	14
1.3.4 Notion de système embarqué [13]	16
1.3.5 Microcontrôleurs utilisés en automatisation	17
1.3.6 Capteurs et actionneurs utilisés.....	18
1.4 Conclusion partielle	19
Chapitre 2 : ANALYSE ET CONCEPTION DU SYSTÈME	20
2.1 Introduction.....	20
2.2 Analyse du système existant	20
2.2.1 Présentation des incubateurs utilisés à Goma	20
2.2.2 Limites observées.....	21
2.3 Spécification des besoins	22
2.3.1 Cahier de charge	22
2.3.2 Besoins fonctionnels	23
2.3.3 Besoins non fonctionnels	23
2.3.4 Contraintes techniques et économiques	24
2.4 Conception du système	24
2.4.1 Architecture globale du système.....	24
2.4.2 Principe de fonctionnement général.....	25
2.5 Algorithme de fonctionnement du système	25

2.5.1	Organigramme général.....	25
2.5.2	Logique de régulation	27
2.5.3	Logique de retournement	27
2.5.4	Logique d’alerte	28
2.5.5	Logique de supervision	28
2.6	Modélisation UML.....	28
2.6.1	Diagramme de cas d’utilisation	28
2.6.2	Description des cas d’utilisation	29
2.6.3	Diagramme de séquence	31
2.7	Conclusion partielle	33
Chapitre 3 . Implémentation et présentation des resultats.....		34
3.1	Introduction.....	34
3.1.1	Présentation du schéma de simulation	34
3.2	Composants matériels utilisés.....	35
3.2.1	Carte microcontrôleur	37
3.2.2	Capteur de température et d’humidité.....	38
3.2.3	Dispositif de chauffage	40
3.2.4	Ventilateur.....	41
3.2.5	Moteur de retournement.....	41
3.2.6	Ecran d’affichage	43
3.2.7	Source d’alimentation	44
3.2.8	Dimensionnement électrique du système.....	46
3.3	Logiciels et outils utilisés.....	51
3.3.1	Environnement de programmation	51
3.3.2	Logiciel de simulation.....	51
3.3.3	Les outils développement de l’application web.....	51
3.3.4	Fonctionnement simulé.....	54
3.4	Réalisation de la maquette	54
3.4.1	Présentation générale de la maquette	54

3.4.2	Assemblage des composants.....	55
3.4.3	Présentation physique du prototype	55
3.4.4	Présentation de l'application web de superposition.....	56
3.5	Tests effectués et résultats obtenus	57
3.5.1	Tests réalisés	57
3.5.2	Présentation synthétique des résultats.....	57
3.6	Discussion des résultats et limites.....	58
3.7	Conclusion partielle	58
	Conclusion Generale	59
	Bibliographie.....	61
	Annexe A	63

Liste des abréviations

AC	Alternative curent
CU	Cas d'utilisation
DC	Direct curent
ESP32	Espressif System 32-bit Microcontroller
FAO	Fods and Agriculture Organizations
GHI	Global Hunger Index
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
LCD	Liquid Crystal Display
PWM	Pulse Width Modulation
UML	Unified Modeling Language

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Cas d'utilisation S'authentifier	29
Tableau 2-2: Cas d'utilisation : Consulter les parametres	30
Tableau 2-3: Cas d'utilisation Regler le seuil.....	31
Tableau 3-1: Principaux éléments matériels retenus pour la conception du prototype	36
Tableau 3-2: Caractéristiques principales du capteur DHT22 [20]	39
Tableau 3-3: Bilan prévisionnel de la puissance électrique du prototype	47

Liste des figures

Figure 1.1. Incubation naturelle des œufs par une poule couveuse dans un nid de paille [6] ...	7
Figure 1.2: Structure interne de l'œuf de la poule [7].....	8
Figure 1.3 : Architecture générale de l'incubateur	10
Figure 1.4: Installation photovoltaïque [12]	14
Figure 1.5: Architecture du système hybride	15
Figure 1.6: Structure d'un système embarqué [13]	16
Figure 1.7: Carte Arduino Uno [14]	17
Figure 1.8: La carte ESP32 [16]	18
Figure 1.9 : Capteur de température [17].....	18
Figure 1.10: Buzzer actif [17]	19
Figure 2.1: Incubateur moderne [18]	21
Figure 2.2: Architecture du système selon les blocs.....	25
Figure 2.3: Ordinogramme du système.....	26
Figure 2.4: Diagramme de cas d'utilisation	29
Figure 2.5: Diagramme de séquence pour le cas d'utilisation « consulter les paramètres » ..	32
Figure 2.6: Cas d'utilisation Réglage de Seuil	32
Figure 3.13 : Schéma général de simulation du système sous Proteus	35
Figure 3.1: Brochage de la carte ESP32 [19].....	37
Figure 3.2: Capteur de température et d'humidité DHT22 [19]	38
Figure 3.3: Brochage du DHT22 [20].....	39
Figure 3.4: Schéma électrique chauffage par lampe à incandescence	40
Figure 3.5: Schéma électrique de ventilation.....	41
Figure 3.6: Principe de fonctionnement du L298N [20].....	42
Figure 3.7: Ecran LCD avec l'interface I2C [21]	44
Figure 3.8: L'alimentation du circuit.....	45
Figure 3.12: Simulation du système de retournement sous Proteus	53
Figure 3.14: le prototype réalisé	55
Figure 3.15: Présentation de l'application.....	56

Figure 3.16: test réalisé sur le prototype	57
Figure 3.9: l'interface du logiciel Arduino	63
Figure 3.11: Implementation de l'application	63
Figure 3.10: Interface du logiciel Proteus.....	64

Introduction générale

0.1. Contexte

La République Démocratique du Congo figure parmi les pays les plus touchés par l'insécurité alimentaire. Selon le Global Hunger Index (GHI) 2026, elle occupe le 7^e rang mondial des pays les plus affectés par la faim, avec une situation jugée grave [1]. Dans ce contexte, l'élevage avicole joue un rôle essentiel pour la sécurité alimentaire et économique, en offrant une source de protéines accessibles et en réduisant la dépendance aux importations.

À Goma, l'aviculture constitue une activité génératrice de revenus pour de nombreuses familles. Cependant, l'une des étapes clés de cette production, à savoir l'incubation des œufs, demeure limitée. L'incubation naturelle, assurée par la poule pendant environ 21 jours, ne permet de couvrir qu'un nombre restreint d'œufs et demeure sensible aux conditions climatiques.

Les incubateurs électriques introduits pour pallier ces limites facilitent la régulation de la température et de l'humidité, mais leur dépendance à une seule source d'énergie, généralement le réseau électrique, pose un problème dans une ville où les coupures de courant sont fréquentes.

Face à ces contraintes, la conception d'un incubateur automatique multi-source (secteur et batterie de secours), doté d'un système de suivi à distance via une application, apparaît comme une solution pertinente.

0.2. Identification et formulation du problème

À Goma, la pratique de l'incubation demeure encore limitée, principalement en raison de la faible fiabilité du réseau électrique public. Cette dépendance quasi exclusive à cette source d'énergie, combinée à l'instabilité du réseau, entraîne des interruptions fréquentes du processus d'incubation, ce qui occasionne des pertes économiques importantes pour les exploitants. En effet, une interruption prolongée de l'incubation peut perturber le développement embryonnaire des œufs : si la coupure de chaleur dépasse environ 10 à 12 heures, le taux d'éclosion peut diminuer considérablement, car la baisse de température ralentit ou arrête la division cellulaire de l'embryon, pouvant entraîner sa mort, des malformations embryonnaires ou un échec total de l'éclosion. Ainsi, la stabilité de l'alimentation électrique constitue un facteur déterminant pour garantir la réussite de l'incubation artificielle et limiter les pertes dans les exploitations avicoles. [2]

0.3. Questions de recherche

Pour répondre à la problématique posée, nous avons formulé les questions de recherche suivantes :

- Comment mettre en œuvre un système d'alimentation fiable permettant d'assurer la continuité du fonctionnement de l'incubateur malgré les interruptions fréquentes du réseau électrique ?
- Comment intégrer un système de suivi et de contrôle à distance basé sur une application web responsive afin de permettre la surveillance en temps réel et la gestion efficace du processus d'incubation ?

0.4. Formulation des hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été formulées afin de répondre aux questions de recherche précédemment posées :

- La mise en œuvre d'un système d'alimentation multi-source fiable, combinant une source principale et une source de secours, fonctionnant avec un mécanisme de basculement automatique, permettrait d'assurer la continuité du fonctionnement de l'incubateur malgré les interruptions fréquentes du réseau électrique.

- L'intégration d'un système de suivi et de contrôle à distance basé sur une application web permettrait la surveillance en temps réel des paramètres d'incubation et une gestion plus efficace du processus, améliorant ainsi la sécurité et les performances globales de l'incubateur.

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

0.5.1. Motivation et intérêt du sujet

L'idée de concevoir un incubateur à œufs automatique est née de l'observation des difficultés rencontrées personnellement en tant qu'éleveur amateur et par le témoignage d'autres éleveurs avicoles : la difficulté d'avoir un incubateur adapté aux contraintes des régions à faible fiabilité énergétique, telle que Goma. En tant qu'habitant de cette ville, nous avons été témoin des coupures fréquentes de courant qui affectent directement les activités d'élevage, notamment l'incubation des œufs. Face à ce constat, l'idée d'intégrer les nouvelles technologies, telles que la dépendance à une source de secours et le suivi à distance via une application web, nous a semblé être une solution envisageable pour répondre à ces défis. Notre intérêt pour ce sujet réside dans l'opportunité de contribuer à la fois à la modernisation de l'élevage avicole et à la recherche de solutions énergétiques adaptées aux réalités locales.

0.5.2. Pertinence sociale du sujet

Socialement, ce projet répond à un besoin des producteurs locaux qui souffrent des coupures de courant et du manque de solutions énergétiques stables pour garantir la continuité de l'incubation des œufs ; nombreux sont ceux qui préfèrent l'importation des poussins plutôt que de réaliser eux-mêmes le travail de l'incubation. En permettant une gestion plus autonome et efficace de l'incubation, ce projet pourrait améliorer le rendement économique et, par conséquent, contribuer à la réduction de l'importation de poussins, à la sécurité alimentaire et à l'augmentation des revenus des producteurs.

0.6. Énoncé des objectifs de recherche

0.6.1. L'objectif général

L'objectif général de cette recherche est de concevoir et de réaliser un incubateur à œufs automatique, autonome, fonctionnant sur plusieurs sources d'énergie (secteur Virunga énergie et l'énergie photovoltaïque avec la batterie de secours) et offrant un système de suivi à distance via une application web afin d'améliorer la gestion du processus d'incubation et les performances global du système.

0.6.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif général, nous nous fixons les objectifs spécifiques suivants :

- Étudier les besoins et les contraintes des incubateurs dans des régions à faible fiabilité énergétique comme Goma.
- Analyser les différentes sources d'énergie disponibles (secteur Virunga énergie, et l'énergie photovoltaïque) et leur combinaison pour assurer l'autonomie de l'incubateur.
- Concevoir un système de gestion intégré permettant un suivi à distance des conditions d'incubation telles que la température, l'humidité et la ventilation via une application web.
- Développer un prototype fonctionnel d'incubateur automatique et le tester dans un environnement réel pour évaluer ses performances et son efficacité.

0.7. Méthodologie et délimitation du travail

0.7.1. Méthodologie

Dans le but d'atteindre l'objectif de ce travail ; la méthode analytique et expérimentale ont permis de déterminer certaines grandeurs physiques et caractéristiques des composants de notre système. La méthode expérimentale a été aussi utilisée pour expliquer le comportement de notre système. Mais aussi nous avons utilisé la documentation, qui nous a servi pour rassembler et consulter différents livres, archives, et cours, des articles publiés sur internet ainsi que les ouvrages à la bibliothèque.

0.7.2. Délimitation du travail

Ce mémoire porte sur la réalisation d'un incubateur à œufs automatique intégrant une alimentation multi-source (secteur et batterie de secours) ainsi qu'un système de suivi à distance via une application web. Le travail se limite à la conception, la fabrication et l'expérimentation d'un prototype, mettant en œuvre les principales fonctionnalités techniques et numériques du dispositif. Les aspects liés à l'industrialisation, à la production en série ou à la certification réglementaire ne sont pas abordés dans ce cadre, mais sont envisagés comme des perspectives de développement futur.

0.8. Structure du mémoire

Voici ce que sera le plan pour arriver à nos fins :

- **Chapitre I : Généralités sur les système d'incubations:** Ce chapitre présente les généralités sur les incubateurs à œufs, les sources d'alimentation électriques (secteur et batterie de secours), et les technologies relatives au développement d'une application mobile de contrôle à distance.
- **Chapitre II : Analyse et conception du système.** Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter le cahier des charges en identifiant les besoins fonctionnels et techniques du futur système. Nous passerons ensuite à la modélisation dudit système en présentant quelques diagrammes UML.

Chapitre III : Implementation et Presentation des resultats. Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord les technologies matérielles et logicielles retenues, en justifiant les choix opérés. Nous décrirons ensuite le processus de conception et de fabrication du prototype, l'assemblage des différents composants, ainsi que les étapes de développement de l'application mobile. Enfin, nous exposerons les résultats obtenus, avant de discuter des limites du système et de proposer des perspectives d'amélioration pour les travaux futurs.

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes d'incubations

1.1 Généralités sur l'aviculture et l'incubation artificielle

1.1.1 Notions générales sur l'aviculture

a. Définition

Selon la définition du dictionnaire Larousse, l'aviculture désigne l'ensemble des activités liées à l'élevage des volailles, notamment pour la production de viande et d'œufs.

b. Rôle de l'aviculture dans la sécurité alimentaire [4]

La FAO définit les quatre « piliers » de la sécurité alimentaire, qui doivent tous être pris en compte dans les efforts déployés pour réduire la faim dans le monde. Les quatre piliers sont respectivement :

- La disponibilité de la nourriture qui se réfère à l'approvisionnement alimentaire,
- L'accès aux aliments qui correspond à la capacité des gens à obtenir de la nourriture quand elle est disponible,
- La stabilité qui vise à assurer une alimentation adéquate en tout temps, étant donné que la disponibilité et l'accès doivent rester stables, et
- L'utilisation qui intègre la sécurité sanitaire des aliments et le bien-être nutritionnel.

Les produits avicoles forment une part importante de la consommation moyenne en protéines, et apportent jusqu'à 5% des protéines dans l'alimentation des ménages les plus pauvres.

La consommation annuelle d'œufs en RDC est estimée à environ 6 à 8 œufs par personne et par an, tandis que la consommation moyenne de viande de volaille est estimée entre 2 et 3 kg par personne par an.

1.1.2 Incubation naturelle vs incubation artificielle

La poule est un animal ovipare dont la reproduction s'effectue par la ponte d'œufs fécondés. [5]

a. Incubation naturelle

L'incubation naturelle se fait par des poules, les cannes, ou les oies, etc.. qui ne peuvent couvrir qu'une dizaine d'œufs à la fois dans un nid.

La durée d'incubation varie selon l'espèce de volaille. Chez la poule, l'éclosion des poussins intervient généralement après 21 jours, tandis que les œufs de canne nécessitent environ 28 jours, pour les cailles, la durée d'incubation est comprise entre 16 et 18 jours, alors qu'elle est d'environ 19 jours chez le pigeon, ces valeurs étant données à titre d'exemples parmi les différentes espèces de volailles.

La Figure 1.1 illustre l'incubation naturelle des œufs par une poule couveuse.



Figure 1.1. Incubation naturelle des œufs par une poule couveuse dans un nid de paille [6]

Pour une incubation naturelle réussie, les facteurs suivants doivent être pris en considération :

- Eau et nourriture sont mis à la disposition de la poule ;
- La poule couveuse est examinée afin de s'assurer qu'elle n'abrite pas des parasites externes,
- Les œufs sont stockés pour incubation à une température de 12 à 14°C, à un taux d'humidité relative élevé de 75 à 85% pendant une période n'excédant pas 7 jours ;
- Après une semaine, les œufs sont mirés pour en tester la fertilité. Le procédé consiste à les regarder par transparence devant une source lumineuse brillante. S'il apparaît une forme sombre à l'intérieur de l'œuf (embryon en développement), c'est que celui-ci est fertile. Un œuf complètement clair est infertile.

La Figure 1.2 illustre l'anatomie de l'œuf de la volaille, à l'exemple de celle de la poule.

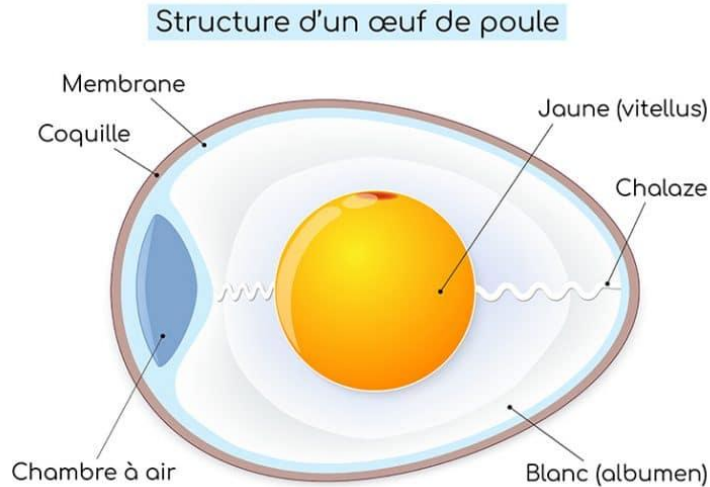


Figure 1.2: Structure interne de l'œuf de la poule [7]

Ainsi l'œuf est constitué de :

- Vitellus (jaune d'œufs), soutenu par les deux chalazes, sur lequel repose le germe si l'œuf a été fécondé,
- L'albumen (le blanc),
- Une coquille calcaire poreuse,
- Une poche d'air appelée chambre à air, située à l'extrémité du gros bout de l'œuf.
- Une membrane qui régule les échanges d'air et d'humidité dans l'œuf.

Pour devenir un poussin, l'embryon contenu dans l'œuf a besoin de 4 éléments :

- La chaleur
- L'air
- L'humidité
- Le retournement.

Au cours de l'incubation et sous l'effet de la chaleur, l'embryon se développe jusqu'à devenir poussin en se nourrissant des substances contenues dans le blanc et le jaune de l'œuf. Durant cette période, l'embryon respire grâce aux pores de la coquille : l'oxygène lui parvient grâce à un réseau de vaisseaux sanguins qui se développe jusqu'à atteindre la surface intérieure de la coquille. L'œuf perd également en moyenne 13 % de son poids en eau entre le 1^{er} et le 19^e jour. Cette perte d'eau s'effectue par les pores de la coquille. [8] L'eau perdue est remplacée au fur et à mesure de

l'incubation, par l'air qui vient augmenter le volume de la chambre à air. Ce dernier est vital pour la respiration du poussin et le découpage de la coquille à la fin de l'incubation.

b. Avantages et limites de l'incubation naturelle

L'incubation naturelle repose sur la capacité de la poule couveuse à maintenir les œufs dans des conditions favorables jusqu'à l'éclosion. Cette méthode présente l'avantage d'être simple et peu coûteuse, puisqu'elle ne nécessite ni alimentation électrique ni dispositif technique particulier. Toutefois, elle reste limitée par le faible nombre d'œufs pouvant être couvés simultanément, par l'indisponibilité permanente des poules couveuses et par l'influence des conditions extérieures sur le taux d'éclosion.

c. Intérêt de l'incubation artificielle

L'incubation artificielle permet de reproduire de manière contrôlée les conditions nécessaires au développement embryonnaire. Elle offre ainsi la possibilité d'incuber un plus grand nombre d'œufs, d'assurer une meilleure maîtrise des paramètres internes et d'améliorer la régularité de la production avicole.

1.2 Principe de fonctionnement d'un incubateur artificiel

1.2.1 Paramètres critiques d'incubation

La réussite de l'incubation, qu'elle soit naturelle ou artificielle, dépend du contrôle rigoureux de plusieurs paramètres biologiques et physiques. Les plus déterminants sont la température, l'humidité relative et la ventilation.

a. Température

La fonction principale d'une couveuse est de maintenir une température constante et stable durant toute la période d'incubation. Pour les œufs de poule, elle doit généralement être maintenue autour de 37,5 °C à 38 °C.

Une température excessive ou insuffisante pendant une durée prolongée peut compromettre le développement embryonnaire et réduire le taux d'éclosion. [9]

b. Humidité relative

L'humidité relative joue un rôle essentiel dans les échanges hydriques de l'œuf et dans le développement de la chambre à air. Durant la majeure partie de l'incubation, elle doit être maintenue dans une plage adaptée, puis augmentée à l'approche de l'éclosion afin de faciliter la sortie du poussin. [9]

c. Ventilation

La ventilation permet le renouvellement de l'air à l'intérieur de l'incubateur. Elle assure l'apport en oxygène nécessaire à l'embryon et l'évacuation du dioxyde de carbone produit durant son développement. [9]

d. Le retournement régulier des œufs.

Le retournement périodique des œufs évite l'adhérence de l'embryon à la coquille et favorise un développement homogène. Dans un incubateur automatique, cette opération doit être programmée selon une fréquence régulière.

1.2.2 Architecture générale d'un incubateur

La Figure 1.3 : Architecture générale de l'incubateur.

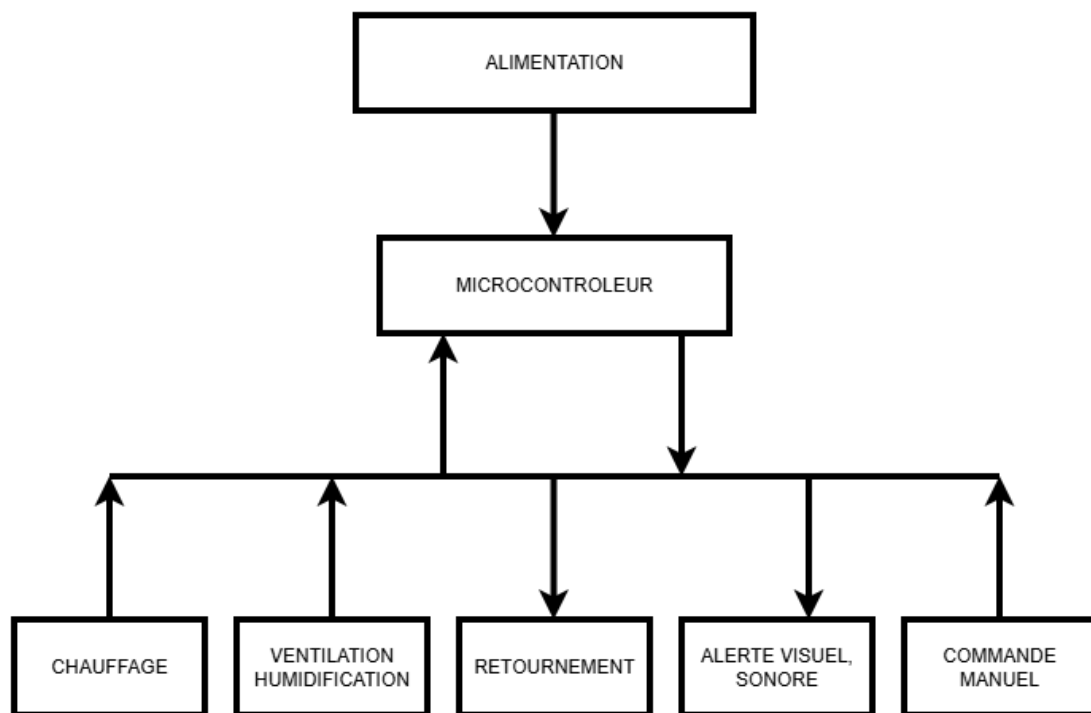


Figure 1.3 : Architecture générale de l'incubateur

a. Alimentation

Le bloc d'alimentation constitue la source d'énergie du système. Il fournit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'ensemble des composants de l'incubateur

b. Bloc abaisseur de tension

Le bloc abaisseur de tension a pour rôle d'adapter la tension provenant de la source d'alimentation à une valeur compatible avec les composants électroniques du système. Il convertit généralement une tension plus élevée en une tension plus faible et stable (par exemple 5 V ou 3,3 V), nécessaire au bon fonctionnement du microcontrôleur et des circuits électroniques.

c. Bloc microcontrôleur

Le microcontrôleur représente l'unité centrale de commande de l'incubateur. Il assure la gestion et la coordination de l'ensemble du système en traitant les informations reçues des capteurs et en commandant les différents actionneurs.

d. Bloc de chauffage

Le bloc de chauffage est chargé de maintenir la température interne de l'incubateur à une valeur optimale pour le développement de l'embryon. Il est activé lorsque la température descend en dessous du seuil défini et permet ainsi de reproduire les conditions thermiques nécessaires à l'incubation des œufs.

e. Bloc ventilation et humidification

Ce bloc assure la circulation de l'air à l'intérieur de l'incubateur et contribue au maintien d'un taux d'humidité approprié. La ventilation permet le renouvellement de l'air et l'évacuation des gaz produits pendant l'incubation, tandis que le système d'humidification aide à maintenir le niveau d'humidité requis pour un développement embryonnaire normal.

f. Bloc de retournement des œufs

Le bloc de retournement des œufs permet de faire pivoter périodiquement les œufs durant l'incubation. Cette opération évite que l'embryon ne se colle à la coquille et favorise un développement homogène du poussin.

g. Bloc d'alerte visuelle et sonore

Le système d'alerte visuelle et sonore sert à informer l'utilisateur en cas de situation anormale ou de dépassement des seuils définis (température, humidité ou dysfonctionnement du système). Les alertes peuvent être émises sous forme de signaux lumineux ou de signaux sonores afin d'attirer rapidement l'attention de l'utilisateur.

1.3 Systèmes d'alimentation électrique

1.3.1 Alimentation par secteur (réseau électrique) [10]

L'alimentation secteur désigne la source d'énergie électrique fournie directement à partir du réseau électrique public sous forme de courant alternatif. Elle représente la source la plus couramment utilisée pour alimenter les équipements domestiques et industriels.

a. Principe [10]

Le fonctionnement de l'alimentation secteur repose sur plusieurs étapes clés :

- **Production** : Le courant alternatif est généré dans des centrales électriques à partir de diverses sources d'énergie comme le charbon, le gaz, le nucléaire, ou les énergies renouvelables (solaire, hydraulique, éolien).
- **Transport** : Ce courant est ensuite transporté via des lignes à haute tension.
- **Distribution** : À proximité des zones d'habitation et d'activité, le courant est transformé en tensions adaptées grâce à des transformateurs. Celui-ci est ensuite distribué dans les réseaux locaux.
- **Utilisation** : Enfin, l'électricité arrive dans les installations via des tableaux électriques qui assurent une répartition sécurisée et conforme aux normes en vigueur.

b. Avantages [10]

- **Stabilité et fiabilité** : Le réseau électrique est conçu pour fournir un courant continu et fiable, indispensable pour le fonctionnement des appareils critiques.
- **Standardisation** : Les tensions normalisées facilitent la conception d'appareils et garantissent leur compatibilité sur le marché international.

- **Accessibilité** : L'alimentation secteur est facilement accessible dans la plupart des zones urbaines .
- **Régulation** : Des systèmes de protection (disjoncteurs, parafoudres) sont intégrés pour sécuriser l'installation.

c. Limites (cas de Goma)

Dans la ville de Goma, nous avons maintenant plusieurs distributeurs de réseaux, mais cela ne peut empêcher que nous ayons une source de secours. Car, par exemple, en cas de panne générale ou de coupure de courant, l'alimentation secteur ne fournit plus d'électricité, ce qui peut perturber les activités. Par ailleurs, le contexte socio-économique local peut exposer certains usagers à des difficultés de règlement des factures d'électricité, entraînant des périodes prolongées sans alimentation électrique. Ainsi, l'intégration d'une source d'énergie de secours dans notre projet apparaît nécessaire pour pallier ce type de difficultés.

1.3.2 Alimentation par source photovoltaïque [11]

a. Principe

Une installation photovoltaïque autonome repose sur la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Ce phénomène se produit lorsque les cellules photovoltaïques, généralement constituées de silicium, absorbent les photons issus du rayonnement solaire et génèrent ainsi une tension électrique.

L'électricité peut ensuite être stockée dans une batterie, ce qui permet d'assurer l'alimentation des équipements même en l'absence d'ensoleillement :

b. Avantages

- L'utilisation d'une source d'énergie renouvelable, gratuite et disponible dans de nombreuses régions ;
- Une grande indépendance vis-à-vis du réseau électrique ;
- Ces installations sont adaptées aux zones où l'accès à l'électricité est instable ou inexistant ;
- Faibles coûts d'exploitation après installation.

c. Limites

- Dépendance aux conditions climatiques
- Coût initial relativement élevé des équipements

- La capacité de stockage des batteries étant limitée

La Figure 1.4 présente une installation photovoltaïque autonome comprenant les principaux éléments du système.

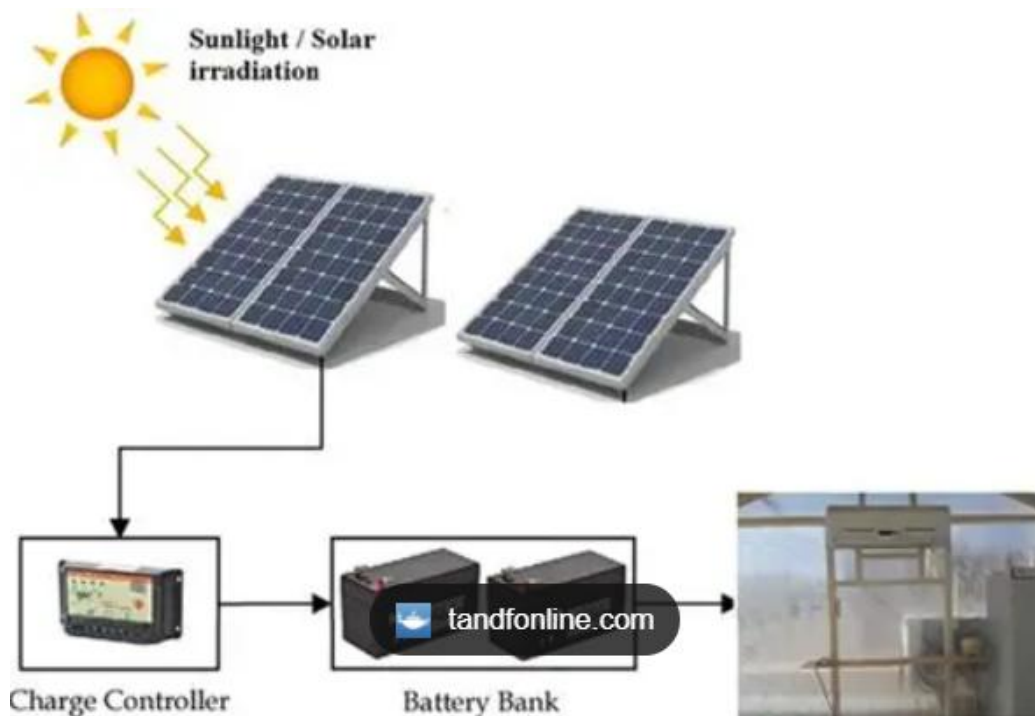


Figure 1.4: Installation photovoltaïque [12]

1.3.3 Systèmes hybrides / multi-source / avec source de secours

Un système d'alimentation multi-source est une architecture énergétique combinant plusieurs sources d'énergie afin d'assurer la continuité de service. Dans le cadre de notre projet, deux sources principales sont exploitées : le réseau électrique (AC secteur) converti en 12 V continu grâce à un redresseur, et un système photovoltaïque composé d'un panneau solaire, d'un régulateur de charge et d'une batterie de stockage.

La Figure 1.5: Architecture du système hybride.

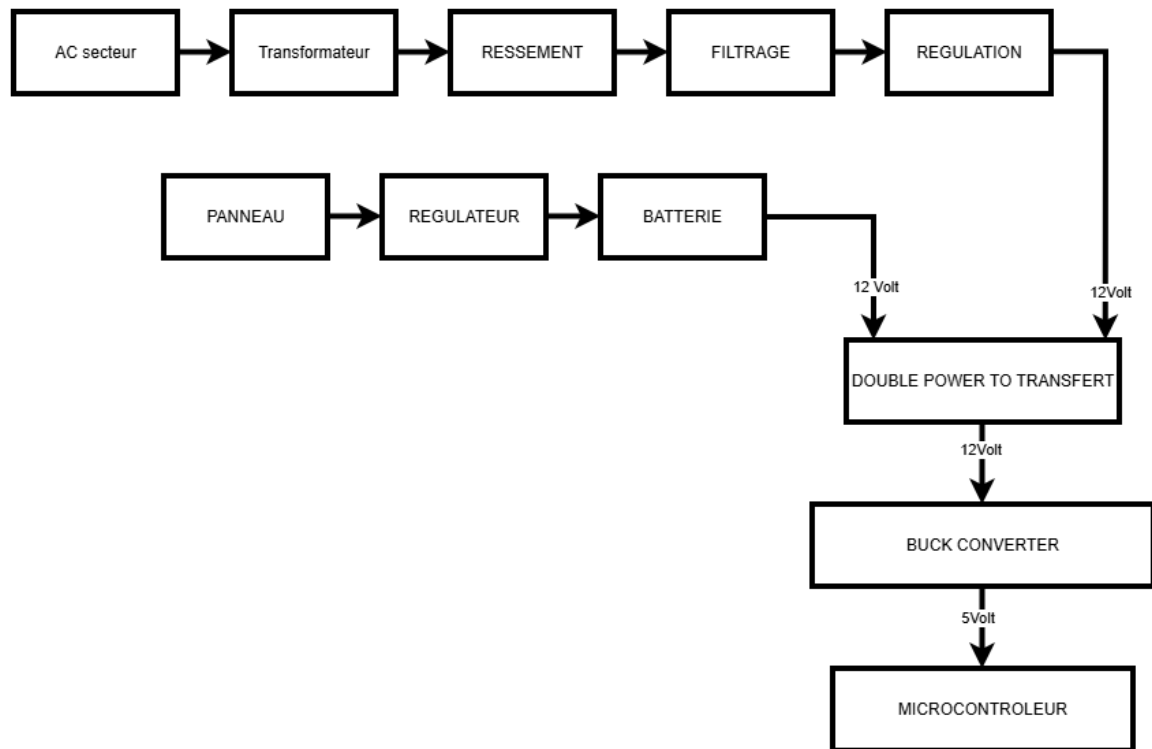


Figure 1.5: Architecture du système hybride

a. Principe de commutation automatique

Le système repose sur un module de transfert d'énergie chargé de sélectionner automatiquement la source disponible. Lorsque le réseau électrique est présent, l'alimentation provient du bloc secteur (transformateur, redressement, filtrage et régulation). En cas d'absence ou d'instabilité du réseau, la batterie prend le relais sans interruption de l'alimentation.

Cette commutation permet d'éviter toute coupure au niveau de la charge alimentée, notamment le microcontrôleur.

b. Gestion intelligente de l'énergie

La gestion énergétique est optimisée par :

- L'exploitation prioritaire du réseau électrique lorsque celui-ci est disponible.
- La bascule automatique vers la batterie en cas de défaillance secteur.
- L'adaptation de la tension via un convertisseur abaisseur (Buck Converter) afin d'obtenir une tension stable de 5 V pour le microcontrôleur.

c. Avantages en zones à instabilité énergétique

L'intégration d'un système hybride présente plusieurs avantages majeurs :

- Continuité de service en cas de coupure secteur
- Autonomie énergétique partielle grâce au solaire
- Protection des équipements électroniques
- Réduction de la dépendance au réseau électrique
- Adaptation aux zones rurales ou à forte instabilité énergétique

Ce type d'architecture est particulièrement adapté aux environnements où la qualité du réseau électrique est variable ou sujette à des interruptions fréquentes.

1.3.4 Notion de système embarqué [13]

a. Définition

Un système embarqué est un système informatique et électronique autonome qui exécute une tâche précise au sein de l'appareil auquel il est intégré. La plupart du temps, cette tâche est réalisée en temps réel. Le terme système embarqué recouvre à la fois le matériel et le logiciel utilisés. Le logiciel est exécuté sur un microcontrôleur, un microprocesseur ou, plus rarement, sur un FPGA.

b. Architecture générale

Voici la Figure 1.6 qui représente la Structure d'un système embarqué .

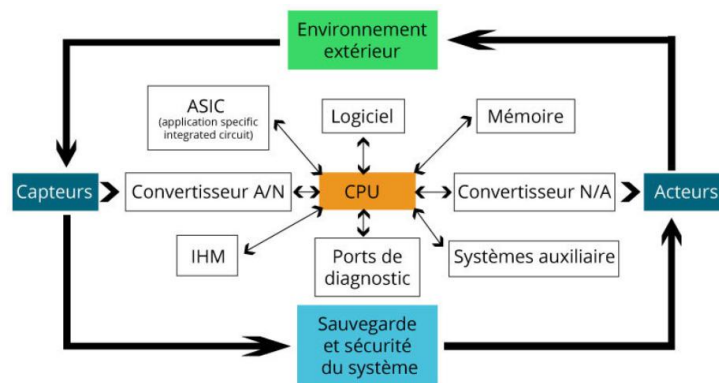


Figure 1.6: Structure d'un système embarqué [13]

1.3.5 Microcontrôleurs utilisés en automatisation

a. Arduino

Arduino est une plateforme de prototypage électronique composée d'une carte de développement et d'un environnement de programmation. [14]

Ainsi, la carte Arduino UNO Rev3 est une carte de développement à microcontrôleur utilisée dans les systèmes embarqués. Elle est conçue autour du microcontrôleur ATmega328P, auquel s'ajoute un microcontrôleur ATmega16U2 assurant l'interface de communication USB-série. [15]

La Figure 1.7: Carte Arduino Uno

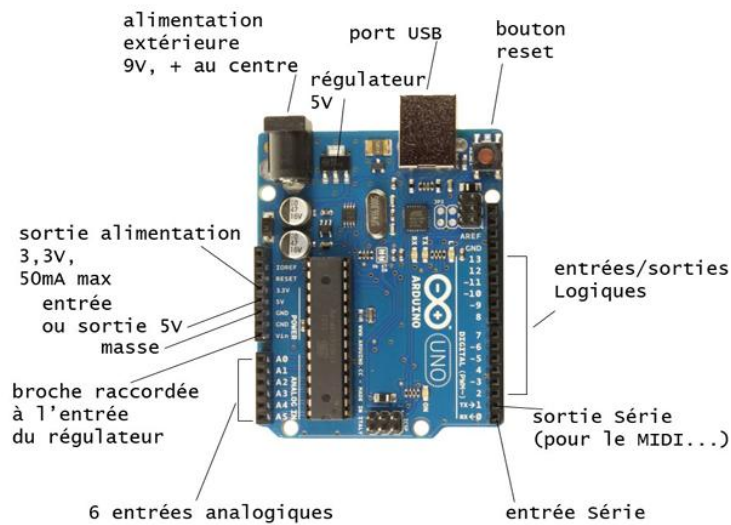


Figure 1.7: Carte Arduino Uno [14]

b. ESP8266 / ESP32 [15]

La carte ESP32 est une carte de développement basée sur un microcontrôleur performant qui intègre des fonctionnalités de communication Wi-Fi et Bluetooth. Elle est largement utilisée dans les systèmes embarqués et les applications de l'Internet des objets (IoT) pour la collecte de données, le contrôle de capteurs et la communication à distance entre différents dispositifs électroniques.

La Figure 1.8: La carte ESP32.



Figure 1.8: La carte ESP32 [16]

1.3.6 Capteurs et actionneurs utilisés

a. Le Capteur

Un capteur est un dispositif électronique capable de détecter une grandeur physique de l'environnement (température, humidité, lumière, pression, etc.) et de la transformer en un signal exploitable par un système électronique ou un microcontrôleur.

A l'exemple d'un DHT qui est un capteur numérique permettant la mesure de la température et de l'humidité. La figure ci-dessous présente un capteur DHT22

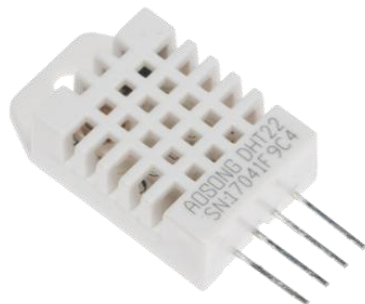


Figure 1.9 : Capteur de température [17]

b. Un Actionneur

Un actionneur est un dispositif qui reçoit un signal de commande provenant d'un système de contrôle (comme un microcontrôleur) et qui agit sur l'environnement en produisant une action physique.

A L'exemple d'un buzzer qui est un actionneur sonore qui convertit un signal électrique en alerte acoustique. La Figure 1.10 présente un Buzzer actif.



Figure 1.10: Buzzer actif [17]

1.4 Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté les bases théoriques nécessaires à la compréhension du projet. Il a mis en évidence l'importance de l'aviculture, les principes biologiques de l'incubation, les paramètres critiques à maîtriser, ainsi que les notions de systèmes embarqués, d'alimentation multi-source et de suivi à distance. Ces éléments constituent le cadre de référence pour l'analyse et la conception du système proposé, qui seront développées dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 : ANALYSE ET CONCEPTION DU SYSTÈME

2.1 Introduction

Après avoir présenté, dans le chapitre précédent, les généralités relatives à l'incubation artificielle, aux paramètres nécessaires au développement des œufs ainsi qu'aux différentes technologies pouvant être utilisées, ce chapitre est consacré à l'analyse et à la conception du système proposé. Il s'agit d'abord d'analyser les solutions d'incubation existantes et d'identifier leurs principales limites dans le contexte étudié. Ensuite, un cahier des charges est établi afin de définir les besoins fonctionnels, les besoins non fonctionnels ainsi que les contraintes auxquelles le système doit répondre. L'algorithme de fonctionnement et la modélisation UML permettent de décrire le comportement global du système avant sa réalisation. L'objectif de ce chapitre est donc de transformer les besoins identifiés en une conception servant de base à la réalisation et à la simulation de l'incubateur automatique.

2.2 Analyse du système existant

2.2.1 Présentation des incubateurs utilisés à Goma

Dans le contexte local de Goma, les incubateurs utilisés sont généralement soit des modèles artisanaux fabriqués localement, soit des modèles importés alimentés principalement par le réseau électrique. Les incubateurs artisanaux sont souvent simples sur le plan technologique, tandis que les modèles importés offrent davantage de fonctions automatiques, mais restent peu accessibles en raison de leur coût.

La Figure 2.1: Incubateur moderne



Figure 2.1: Incubateur moderne [18]

2.2.2 Limites observées

a. Dépendance énergétique

La principale limite observée est la forte dépendance à l'énergie électrique du réseau public. À Goma, les coupures d'électricité sont parfois observées et peuvent durer plusieurs heures, voire plusieurs jours. Or, l'incubation exige une température stable autour de 37 à 37,5 °C. Une interruption prolongée du chauffage peut entraîner la mort des embryons. La plupart des incubateurs existants ne disposent pas d'un système d'alimentation de secours automatique.

b. Absence de supervision

Les incubateurs artisanaux ne permettent pas un suivi à distance des paramètres internes. L'éleveur doit être physiquement présent pour vérifier la température, l'humidité ou l'état du système. En cas de panne ou de dérive thermique, il n'y a pas d'alerte automatique. Cela augmente le risque de pertes importantes, surtout si l'éleveur est absent.

2.3 Spécification des besoins

2.3.1 Cahier de charge

a) Présentation du cahier des charges

Dans le cadre de ce travail, le système proposé vise à concevoir et réaliser un incubateur à œufs automatique capable d'assurer la surveillance et la régulation des principaux paramètres d'incubation, tout en garantissant la continuité de fonctionnement grâce à une alimentation de secours par batterie et en permettant un suivi à distance à travers une application web.

Le cahier des charges est ainsi établi en fonction du contexte local de Goma, caractérisé notamment par l'instabilité de l'alimentation électrique, ainsi que des besoins de l'utilisateur final. Le système doit être simple, fiable, économique et suffisamment robuste pour assurer les principales opérations nécessaires au processus d'incubation.

b) Objectif du système

L'objectif principal est de concevoir et réaliser un incubateur automatique capable de :

- maintenir automatiquement les conditions nécessaires à l'incubation ;
- surveiller la température et l'humidité à l'intérieur de l'incubateur ;
- effectuer automatiquement le retournement périodique des œufs ;
- assurer la continuité de fonctionnement lors d'une coupure de la source principale grâce à une batterie de secours ;
- permettre à l'utilisateur de consulter à distance les principaux paramètres du système à travers une application web ;

2.3.2 Besoins fonctionnels

Le système proposé doit répondre à un ensemble de besoins fonctionnels liés aux exigences du processus d'incubation artificielle ainsi qu'aux contraintes d'utilisation dans le contexte local.

- Le système doit maintenir la température dans une marge normale.
- Le système doit permettre le contrôle de l'humidité interne.
- Le système doit intégrer un mécanisme de basculement automatique entre les différentes sources d'alimentation afin d'assurer la continuité de fonctionnement.
- Le système doit assurer le retournement automatique des œufs selon une fréquence définie.
- Le système doit permettre à l'utilisateur de consulter et de paramétrer les seuils de température, humidité.
- Le système doit permettre à l'utilisateur de visualiser l'état des sources d'alimentation.
- Le système doit permettre à l'utilisateur de configurer certains paramètres.
- Le système via l'application web doit permettre à l'utilisateur de démarrer et d'arrêter le système.

2.3.3 Besoins non fonctionnels

En plus des exigences fonctionnelles, le système proposé doit satisfaire à plusieurs besoins non fonctionnels. Le système doit :

- Le système doit être fiable afin d'assurer un fonctionnement continu et stable durant toute la période d'incubation.
- Le système doit être simple d'utilisation afin de permettre une manipulation facile par les utilisateurs, même sans connaissances techniques approfondies.
- Le système doit être robuste afin de résister aux variations de tension et aux conditions environnementales locales.
- Le système doit être économique afin de limiter les coûts de réalisation et de maintenance du prototype.

2.3.4 Contraintes techniques et économiques

La conception du système s'inscrit dans un environnement marqué par plusieurs contraintes :

- La première contrainte est liée à l'instabilité de l'alimentation électrique locale. Cette réalité impose de concevoir une architecture capable de fonctionner malgré les coupures du réseau principal ;
- La deuxième contrainte concerne les ressources limitées. Dans le cadre d'un projet académique, les moyens financiers, les composants accessibles et les outils de réalisation peuvent être limités. Il est donc nécessaire d'opter pour des solutions techniques à la fois simples, efficaces et économiquement supportables ;
- La troisième contrainte est liée au niveau d'exigence de l'utilisateur final. Le système doit rester compréhensible, facile à manipuler et à surveiller, même pour un utilisateur non spécialiste ;

2.4 Conception du système

2.4.1 Architecture globale du système

Le système proposé repose sur une architecture fonctionnelle organisée en plusieurs blocs indépendants, chacun assurant une fonction spécifique dans le processus global d'incubation.

L'architecture générale comprend principalement un bloc d'alimentation, un bloc d'acquisition, un bloc de commande, un bloc d'actionneurs, un bloc d'affichage et un bloc de communication. Le bloc d'alimentation fournit l'énergie nécessaire aux différents éléments du système à partir des sources disponibles. Le bloc d'acquisition assure la mesure des paramètres internes, notamment la température et l'humidité. Le bloc de commande, centré sur le microcontrôleur, traite les informations reçues et prend les décisions de pilotage. Le bloc d'actionneurs exécute les ordres émis par le système de commande. Le bloc d'affichage permet la consultation locale des paramètres, tandis que le bloc de communication assure la transmission des données vers l'application.

La Figure 2.2 représente l'architecture selon les blocs du système.

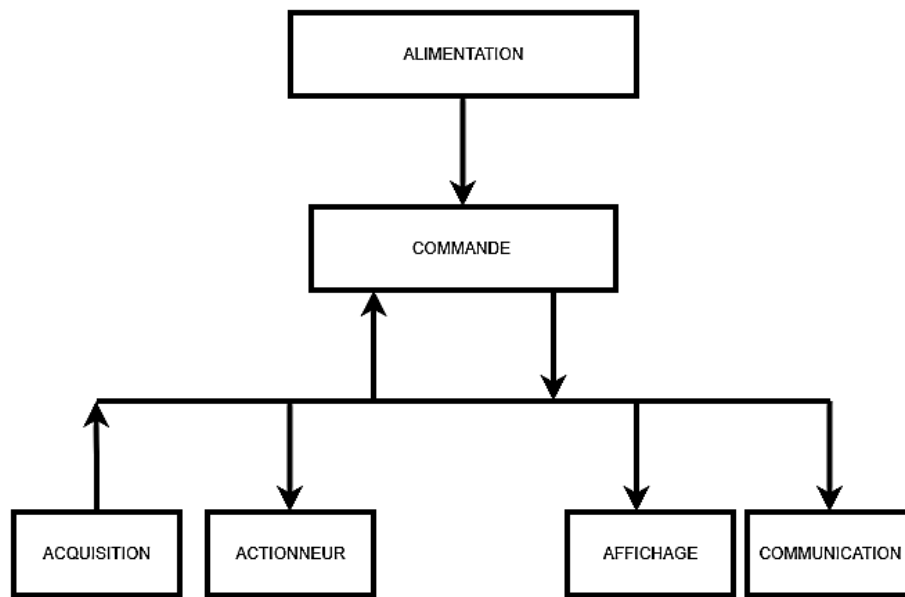


Figure 2.2: Architecture du système selon les blocs

2.4.2 Principe de fonctionnement général

Le fonctionnement du système repose sur une logique cyclique de surveillance et de commande. Après l'initialisation des différents modules, le microcontrôleur procède à l'acquisition des données mesurées par les capteurs. Les valeurs obtenues sont ensuite comparées aux seuils de fonctionnement définis.

Lorsque la température mesurée descend en dessous de la consigne programmée, le système active le dispositif de chauffage. Lorsque les conditions du système l'exigent, la ventilation est assurée afin de favoriser le renouvellement de l'air à l'intérieur de l'incubateur. Le retournement des œufs est exécuté automatiquement selon une période déterminée lors de la conception.

2.5 Algorithme de fonctionnement du système

2.5.1 Organigramme général

Le fonctionnement du système peut être représenté par un organigramme général décrivant la succession logique des opérations effectuées par le microcontrôleur.

Le processus débute par l'initialisation des modules, notamment le capteur, l'afficheur, les sorties de commande et l'interface de communication. Après cette phase, le système entre dans une boucle de fonctionnement continue.

Au cours de cette boucle, le microcontrôleur lit les valeurs de température et d'humidité, met à jour l'affichage local, compare les mesures aux consignes, commande les actionneurs concernés, vérifie l'échéance du retournement automatique, transmet les informations vers l'application et déclenche une alerte si un écart critique est détecté. L'image de la Figure 2.3: Ordinogramme du système .

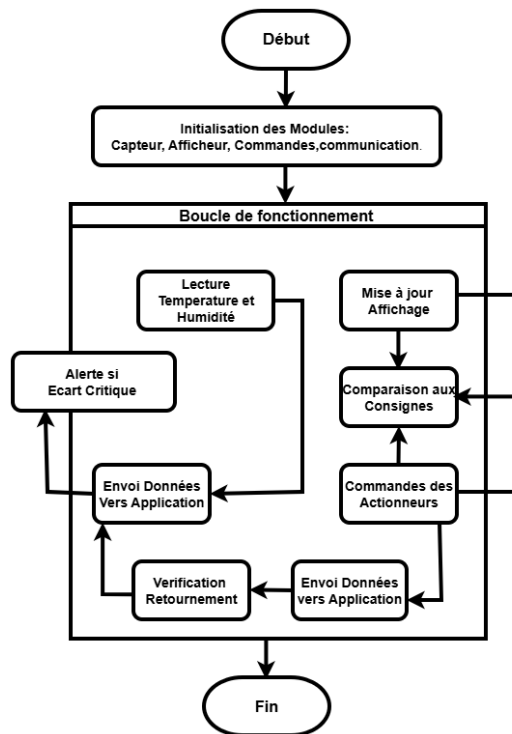


Figure 2.3: Ordinogramme du système

2.5.2 Logique de régulation

La logique de régulation repose sur la comparaison entre les valeurs mesurées par les capteurs et les seuils définis dans le système. Lorsque la température descend en dessous du seuil minimal fixé

à 37,5 °C, le système active automatiquement le dispositif de chauffage afin de rétablir les conditions thermiques requises. Lorsque la température atteint ou dépasse la valeur de consigne (38 degré maximum), le chauffage est désactivé afin d'éviter toute surchauffe à l'intérieur de l'incubateur.

De manière similaire, l'humidité est continuellement surveillée par le système. Lorsque le taux d'humidité devient inférieur au seuil défini à 75 %, le système déclenche une alerte sonore afin que l'utilisateur en soit informé et prenne des précautions.

La ventilation participe également au maintien des conditions internes en favorisant le renouvellement de l'air ainsi qu'une meilleure répartition de la chaleur et de l'humidité dans l'incubateur.

2.5.3 Logique de retournement

Le retournement des œufs est programmé selon un intervalle régulier afin d'assurer une manipulation périodique sans intervention humaine directe. Cette tâche est gérée automatiquement par le microcontrôleur, qui commande le moteur de retournement selon une durée ou une position déterminée.

Pour éviter de casser les œufs, plusieurs précautions sont prises. Le mécanisme de retournement est conçu pour effectuer un mouvement lent et contrôlé grâce au moteur pas à pas. Le retournement est effectué à intervalles réguliers, toutes les deux heures, et non de manière continue. Le déplacement du plateau est également limité par des interrupteurs de fin de course afin d'éviter une rotation excessive. Aussi le choix du moteur pas à pas permet de contrôler précisément le mouvement du mécanisme. Nous pouvons donc déterminer le nombre de pas nécessaires pour obtenir le déplacement souhaité sans mouvement brusque.

2.5.4 Logique d'alerte

Le système prévoit l'émission d'une alerte en cas d'anomalie de fonctionnement ou de dépassement critique d'un seuil programmé. L'objectif de cette fonction est de prévenir rapidement l'utilisateur afin de favoriser une intervention adaptée.

L'alerte peut être matérialisée par un signal sonore local et, selon les fonctionnalités implémentées, par une notification ou une remontée d'information vers l'application. L'ajustement automatique permet au système de corriger les variations normales des paramètres sans intervention humaine. Cependant, l'alerte a un autre objectif : informer l'utilisateur lorsqu'une anomalie persiste malgré la régulation automatique. Cela permet de détecter une éventuelle panne du chauffage, du ventilateur, du capteur ou encore un problème d'alimentation. Ainsi, l'automatisation ne remplace pas complètement la surveillance humaine ; elle permet surtout de réduire les interventions tout en alertant l'utilisateur lorsqu'une intervention devient nécessaire.

2.5.5 Logique de supervision

La supervision à distance repose sur la transmission périodique des paramètres mesurés vers l'application. Cette fonction permet à l'utilisateur de consulter les données essentielles, telles que la température, l'humidité ou encore certains états du système.

Cette logique de supervision améliore la praticité du dispositif et constitue un apport important du système proposé par rapport aux incubateurs plus classiques ne disposant pas d'interface de suivi à distance.

2.6 Modélisation UML

2.6.1 Diagramme de cas d'utilisation

Les cas d'utilisation principaux sont :

- Consulter les paramètres de l'incubateur.
- Régler les seuils de température et d'humidité.
- Recevoir une alerte.
- Démarrer et arrêter l'incubation.

Sur la Figure 2.4 nous retrouvons le diagramme UML du système.

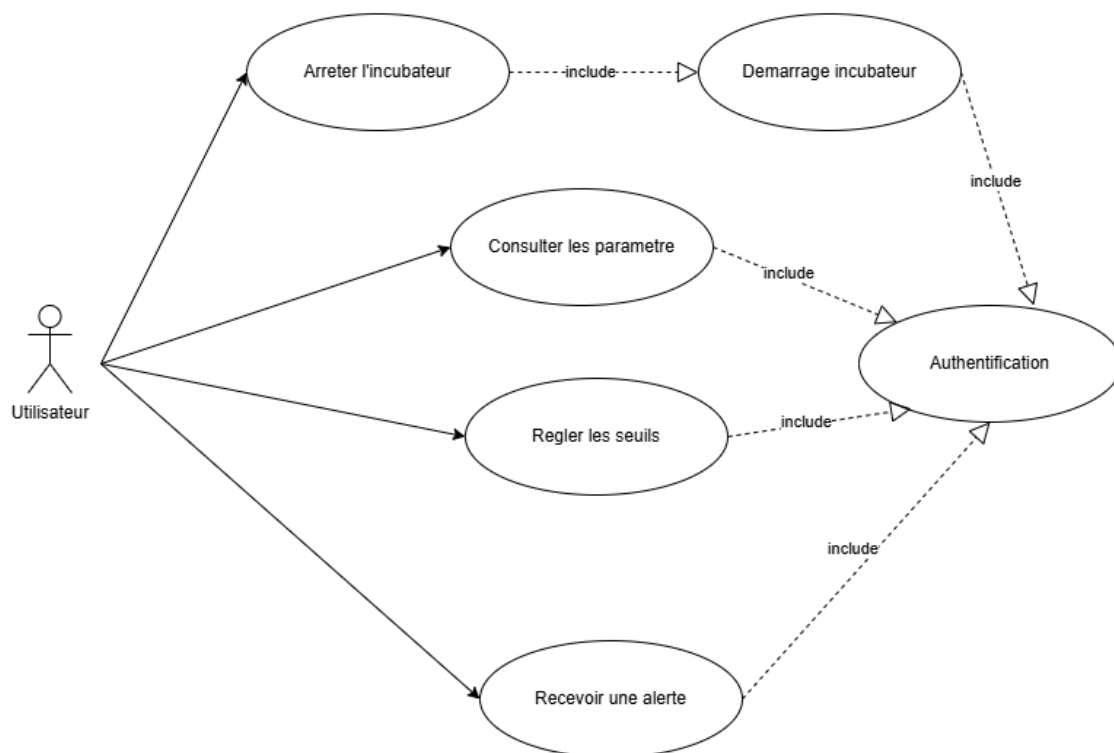


Figure 2.4: Diagramme de cas d'utilisation

2.6.2 Description des cas d'utilisation

Tableau 2-1: Cas d'utilisation S'authentifier

Rubrique	Description
ID	CU1
Description	Permet à l'utilisateur de s'authentifier dans l'application afin d'accéder aux fonctionnalités de surveillance et de commande de l'incubateur.
Acteur principal	Utilisateur
Preconditions	L'utilisateur possède un compte valide et l'application est installée sur son appareil.
Enchainement Principal	1. L'utilisateur ouvre l'application. 2. Le système affiche le formulaire d'authentification. 3. L'utilisateur saisit son nom d'utilisateur

	ainsi que son mot de passe. 4. Le système vérifie les informations saisies. 4.1. Si les informations sont correctes, l'accès est autorisé. 4.2. Si les informations sont incorrectes, un message d'erreur est affiché et l'utilisateur est invité à réessayer. 5. Le système affiche l'interface principale de contrôle de l'incubateur.
Postcondition	L'utilisateur est authentifié et peut accéder aux différentes fonctionnalités de l'application

Tableau 2-2: Cas d'utilisation : Consulter les paramètres

Rubrique	Description
ID	CU2
Description	Permet à l'utilisateur de consulter les paramètres de fonctionnement de l'incubateur
Acteur Principal	Utilisateur
Precondition	L'utilisateur est authentifié et l'incubateur est connecté à l'application.
Enchaînement principal	1. L'utilisateur sélectionne 'Consulter les paramètres' 2. Le système récupère les données envoyées par l'ESP32. 3. Le système affiche la température actuelle. 4. Le système affiche le taux d'humidité. 5. Le système affiche l'état du chauffage, du ventilateur et du moteur de retournement.
Postcondition	L'utilisateur visualise l'état actuel de l'incubateur et des équipements.

Tableau 2-3: Cas d'utilisation Régler le seuil

Rubrique	Description
ID	CU3
Description	Permet à l'utilisateur de modifier les seuils de température et d'humidité utilisés pour la régulation automatique de l'incubateur.
Acteur principal	Utilisateur
Préconditions	L'utilisateur est authentifié.
Enchaînement principal	1. L'utilisateur sélectionne Régler le seuil 2. Le système affiche les seuils 3. L'utilisateur saisit les nouvelles valeurs souhaitées. 4. Le système vérifie que les valeurs sont valides. 4.1. Si les valeurs sont valides, elles sont enregistrées dans le système. 4.2. Dans le cas contraire, un message d'erreur est affiché. 5. Les nouveaux seuils sont pris en compte lors de la régulation automatique
Postcondition	Les nouveaux seuils sont enregistrés et utilisés par le système de contrôle.

2.6.3 Diagramme de séquence

Le diagramme de séquence permet de représenter l'enchaînement temporel des échanges entre les différents éléments du système dans le cadre d'un scénario donné.

a) Diagramme de séquence pour le cas d'utilisation consulter les paramètres.

Voici la Figure 2.5: Diagramme de séquence pour le cas d'utilisation « consulter les paramètres ».

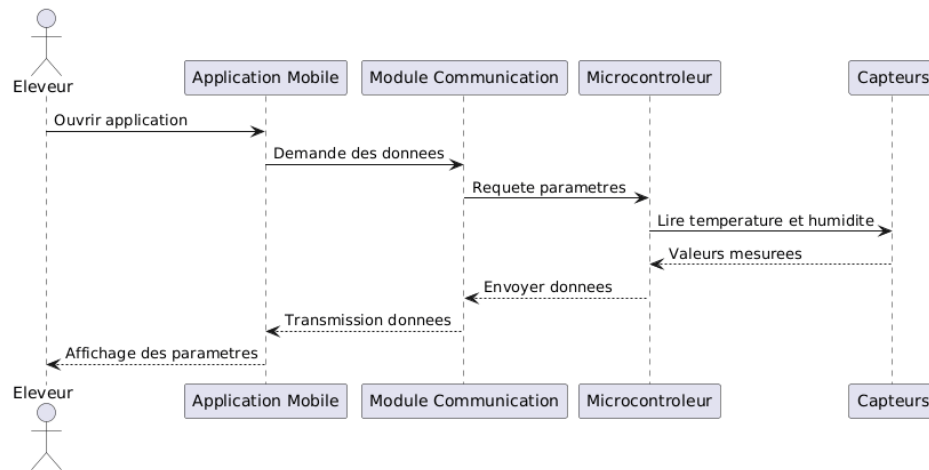


Figure 2.5: Diagramme de séquence pour le cas d'utilisation « consulter les paramètres »

b) Diagramme de séquence pour le cas d'utilisation Réglage de Seuil.

Et voici aussi la Figure 2.6: Cas d'utilisation Réglage de Seuil.

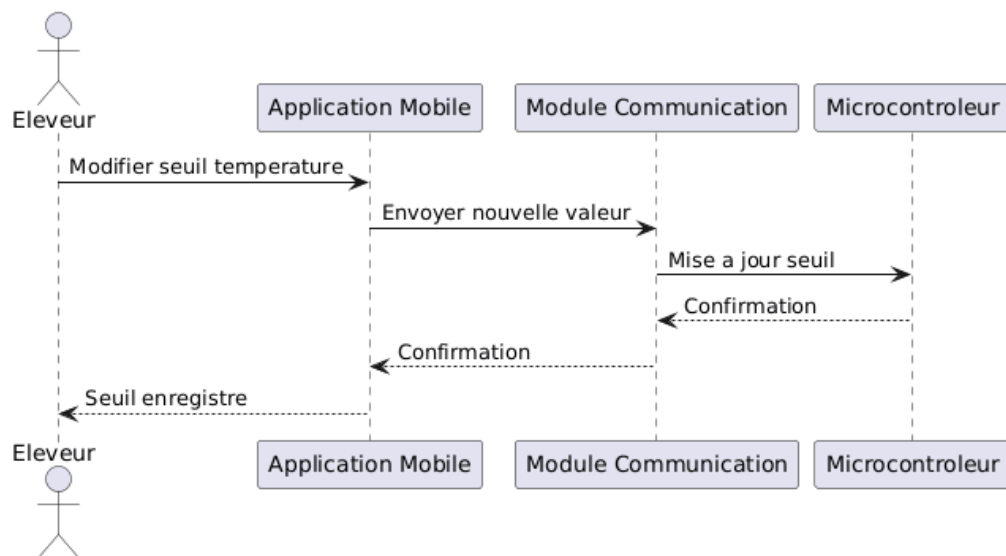


Figure 2.6: Cas d'utilisation Réglage de Seuil

2.7 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, il a été question d'analyser les limites des incubateurs existants et de définir les exigences du système proposé. À partir de cette analyse, un cahier des charges a été établi, puis une architecture fonctionnelle du système a été conçue. La description des différents blocs de l'architecture, la logique générale de fonctionnement ainsi que la modélisation UML ont permis de structurer le prototype sur le plan conceptuel. Cette étape de conception constitue une base essentielle pour la réalisation pratique, la simulation et la présentation du système, qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3. Implémentation et présentation des resultats

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation et à la réalisation pratique d'un incubateur automatique à alimentation multisource (source principale et source de secours) . Il expose la mise en œuvre concrète du système, depuis le choix des composants jusqu'aux essais de validation du prototype réalisé.

3.1.1 Présentation du schéma de simulation

Avant la réalisation physique du prototype, une simulation de la partie embarquée a été effectuée à l'aide du logiciel Proteus Professional afin de représenter le fonctionnement général du système. Voici une image du schéma général à la Figure 3.1:

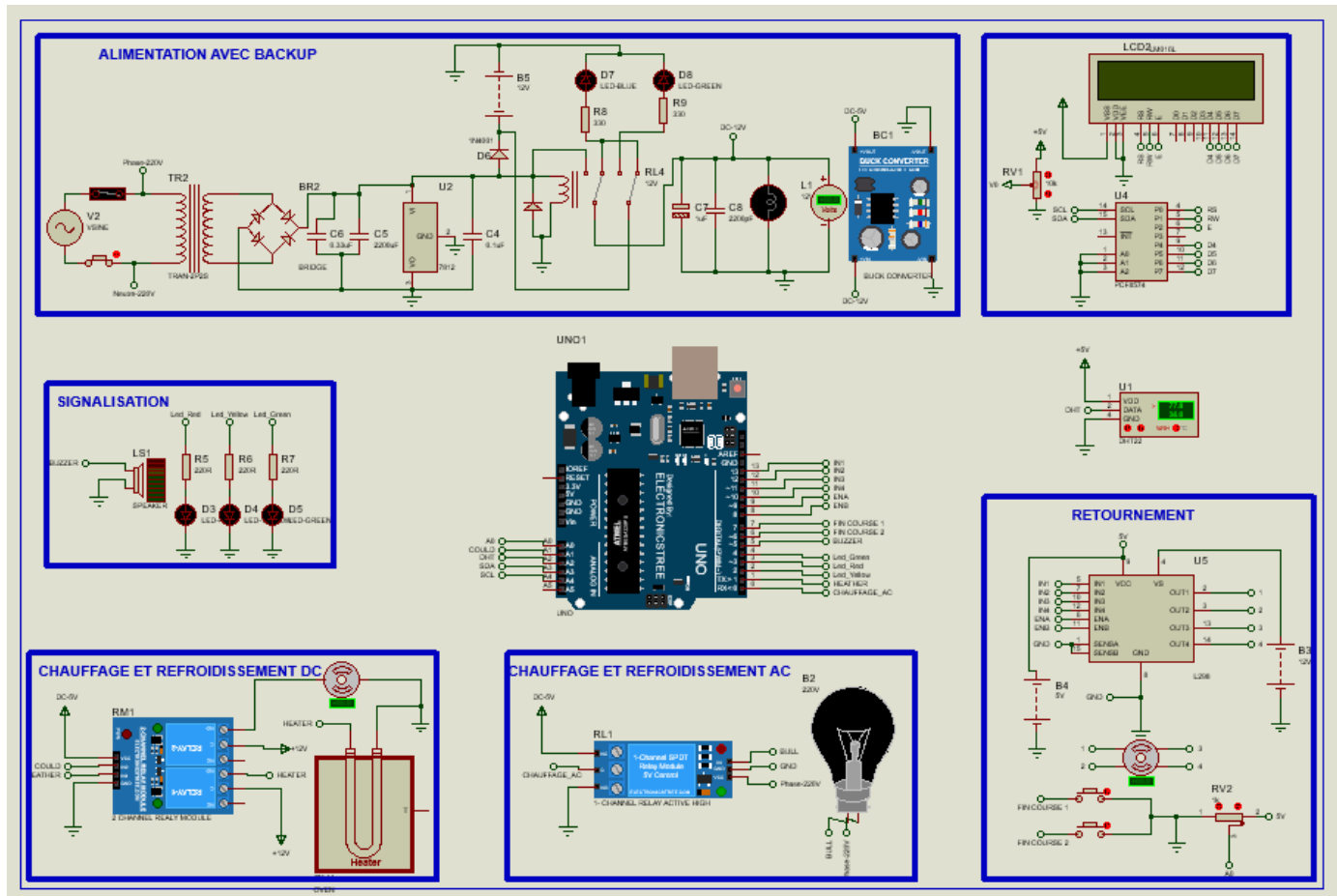


Figure 3.1 : Schéma général de simulation du système sous Proteus

3.2 Composants matériels utilisés

Le choix de ces composants a été guidé par des critères de disponibilité, de coût, de simplicité d'intégration et d'adaptation aux objectifs du projet. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les principaux composants matériels retenus pour la simulation et la réalisation du prototype, ainsi que leurs quantités et leurs fonctions respectives.

Tableau 3-1: Principaux éléments matériels retenus pour la conception du prototype

Composant	Quantité	Fonction principale
ESP32	1	Commande centrale et communication (utiliser dans le prototype)
Arduino Uno	1	Commande centrale (utiliser dans la simulation)
DHT22	1	Mesure de la température et de l'humidité
L298N	1	Commande du moteur de retournement
Moteur à courant continu 12V	1	Retournement des œufs
Relay	2	Chauffage et Ventilation
Lampe chauffante	1	Production de chaleur
Ventilateur 12V	1	Circulation de l'air
LCD 16x2 I2C	1	Affichage local
Buzzer	1	Alerte sonore
Batterie 12V	1	Alimentation de secours
Convertisseur Buck	1	Conversion de 12 V vers 5 V
Bouton Poussoir	2 + 3	Détection de fin de course moteur, la commande manuelle
Transformateur	1	Abaisser la tension
Potentiomètre	2	Ajuster la luminosité du LCD et régler la vitesse du moteur de retournement

3.2.1 Carte microcontrôleur

Le système utilise la carte ESP32 comme unité centrale de commande. Elle a été choisie pour son module Wi-Fi intégré, son nombre important d'entrées-sorties programmables (GPIO), sa compatibilité avec de nombreux capteurs ainsi que sa capacité à piloter différents actionneurs. Dans le cadre de ce travail, la carte Arduino Uno a principalement été utilisée pour les simulations sous Proteus, tandis que l'ESP32 a été retenue pour la réalisation pratique du prototype. Ainsi, l'ESP32 constitue le cœur du système de commande de l'incubateur, assurant l'acquisition des données, leur traitement, la commande des actionneurs et la transmission des informations vers l'application web. La Figure 3.2: Brochage de la carte ESP32.

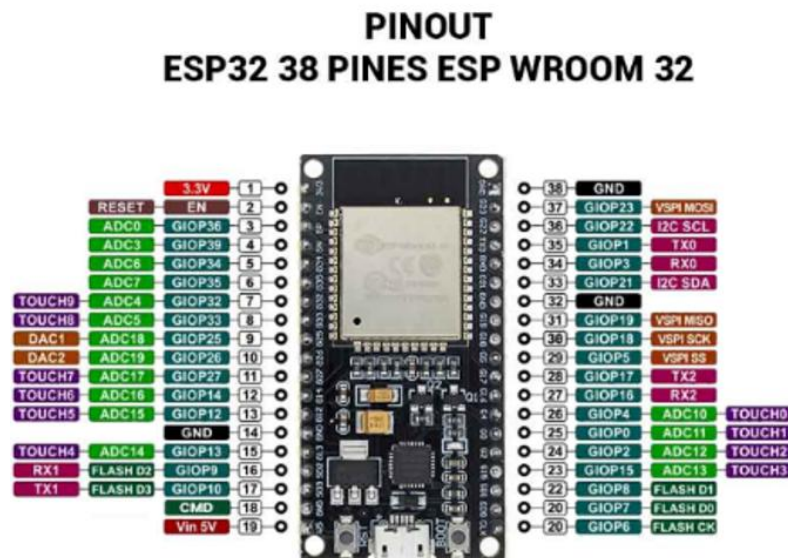


Figure 3.2: Brochage de la carte ESP32 [19]

3.2.2 Capteur de température et d'humidité

Le capteur de température et d'humidité de type DHT22 a été adopté dans ce projet. La Figure 3.3, illustre un Capteur de température et d'humidité DHT22.

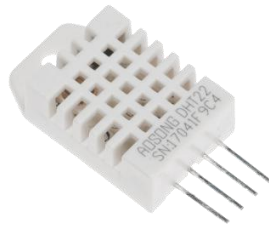


Figure 3.3: Capteur de température et d'humidité DHT22 [19]

Le DHT22 est un capteur numérique combiné capable de mesurer simultanément la température et l'humidité relative. Il représente une plage de mesure allant de -40°C à $+80^{\circ}\text{C}$ pour la température et de 0% à 100% pour l'humidité relative, ce qui le rend adapté aux applications. En termes de précision, ce capteur offre une exactitude de plus ou moins $0,5^{\circ}\text{C}$ et la température de plus ou moins 2 à 5% pour l'humidité relative.

Le DHT22 fonctionne sous une tension comprise entre 3,3 V et 6 V, avec une faible consommation énergétique qui le rend compatible avec les systèmes embarqués. Le capteur DHT22 est reliée à une entrée de l'esp32 avec une résistance de tirage (pull-up) sur une ligne de données afin d'assurer une transmission stable. Le choix du dht22 a été retenu en raison de sa meilleure précision et de sa plage de mesure plus étendue par rapport au capteur DHT11.

La Figure 3.3: Capteur de température et d'humidité DHT22

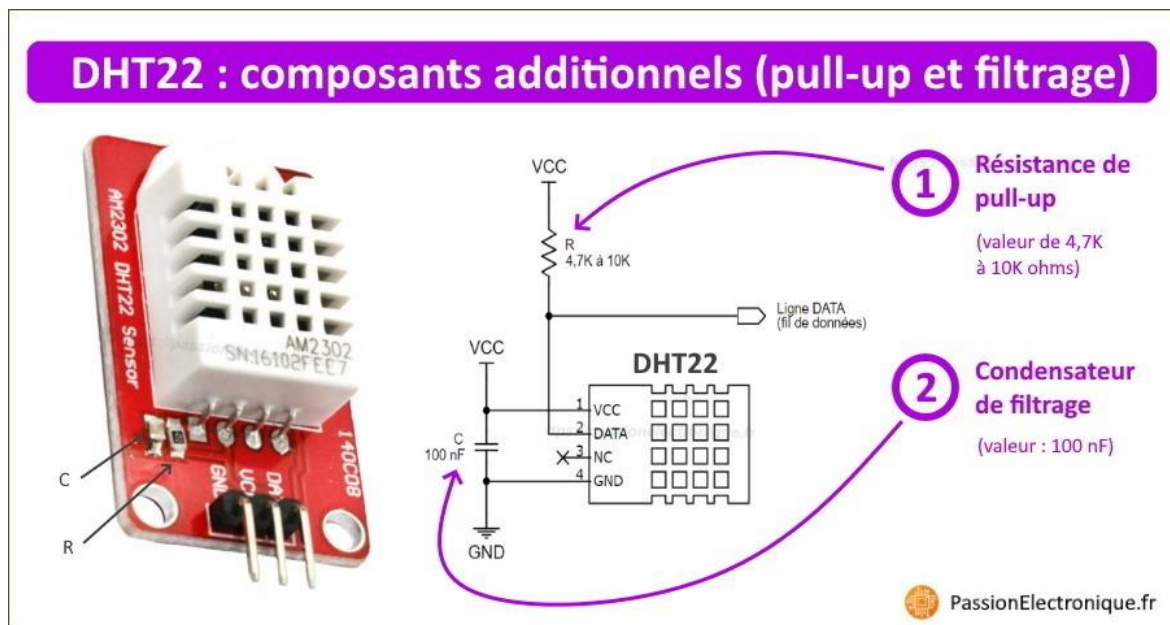


Figure 3.4: Brochage du DHT22 [20]

Et voici le Tableau 3-2: Caractéristiques principales du capteur DHT22 .

Tableau 3-2: Caractéristiques principales du capteur DHT22 [20]

Caractéristiques	Valeurs
Tension d'alimentation	3,3 à 6V (type. 5V)
Plage de mesure température	-40°C à +80 °C
Précision de la mesure de température	± 0,5 °C
Plage de mesure humidité relative	0% à 100%
Précision de mesure de l'humidité	± 2 à 5%
Courant consommé (pendant les mesures et au repos)	1,5 mA / 50 µA

3.2.3 Dispositif de chauffage

Le système de chauffage a pour rôle de maintenir la température interne de l'incubateur dans la plage requise pour le bon développement embryonnaire. La stabilité thermique constitue en effet un paramètre essentiel durant tout le cycle d'incubation.

Dans le cadre de ce prototype, le chauffage est assuré par une lampe à incandescence commandée électriquement par le microcontrôleur à travers un module relais. Ce choix a été motivé par la disponibilité du composant, sa simplicité d'intégration ainsi que son faible coût.

L'utilisation du relais permet également d'assurer l'isolation entre la partie commande basse tension et la partie puissance alimentant le système de chauffage. D'autres solutions telles que les résistances chauffantes existent, mais elles ont été difficiles à trouver ; ainsi, la lampe à incandescence a été retenue pour ce prototype. Voici à la Figure 3.5 , le schéma de câblage du système de chauffage.

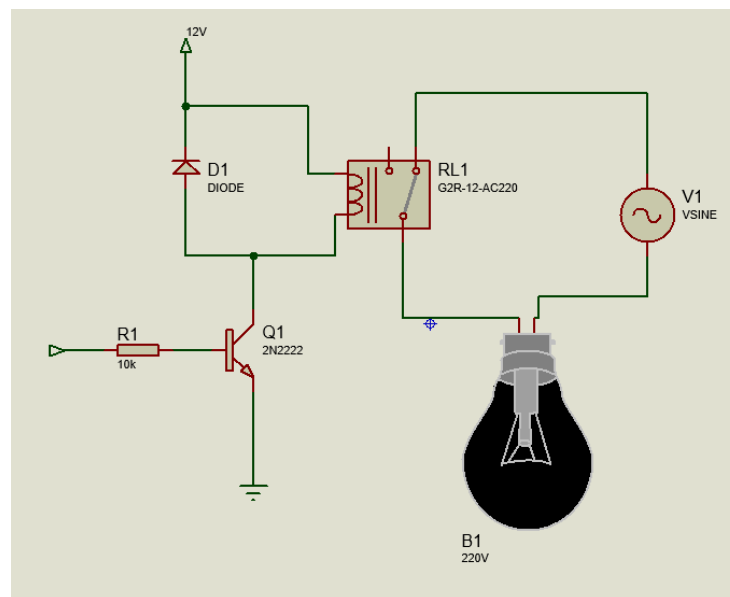


Figure 3.5: Schéma électrique chauffage par lampe à incandescence

3.2.4 Ventilateur

Le ventilateur assure la circulation de l'air dans l'incubateur. Il favorise une meilleure répartition de la chaleur produite par le système de chauffage et contribue au renouvellement de l'air interne. Dans ce prototype, nous avons utilisé un ventilateur alimenté en 12 volts continu. Il permet de limiter les écarts de température entre les différentes zones internes de l'incubateur et d'améliorer l'homogénéité thermique. Voici à la Figure 3.6: Schéma électrique de ventilation.

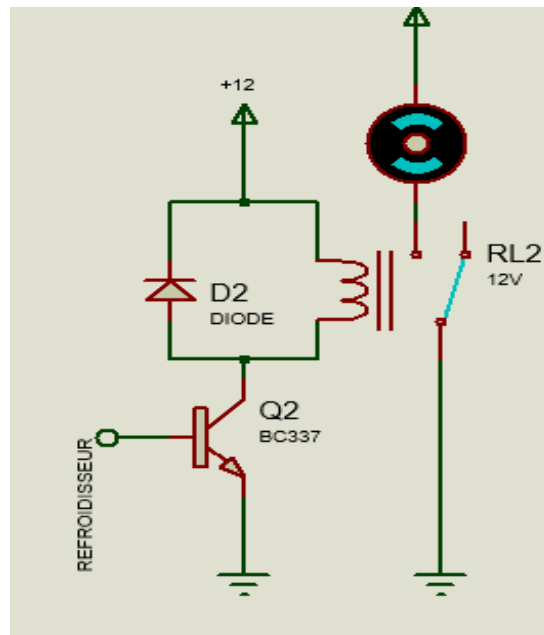


Figure 3.6: Schéma électrique de ventilation

3.2.5 Moteur de retournement

Dans ce projet, le retournement des œufs est assuré par un moteur à pas à pas commandé à l'aide d'un module L298N.

Le L298N est un circuit intégré contenant deux ponts en H, permettant de piloter un ou deux moteurs à courant continu ou un moteur pas à pas en contrôlant à la fois leur sens de rotation et leur vitesse.

Le principe de fonctionnement du L298N repose sur l'utilisation des ponts en H, qui permettent d'inverser le sens du courant traversant le moteur. Ainsi, en modifiant l'état des entrées de

commande, il est possible de faire tourner le moteur dans un sens ou dans l'autre. La Figure 3.7: Principe de fonctionnement du L298N .

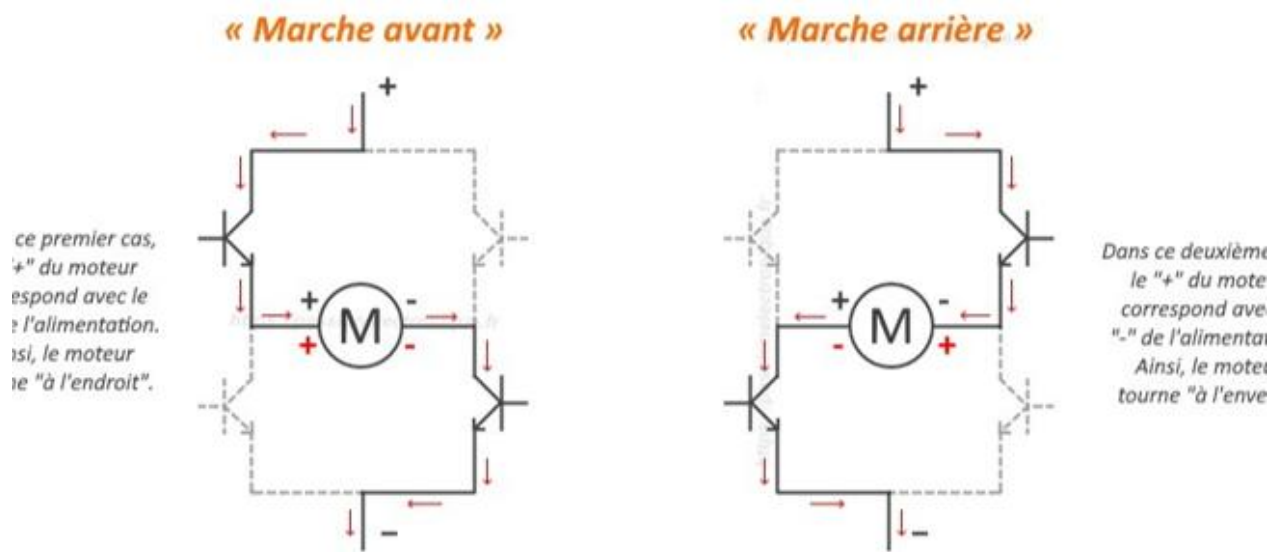


Figure 3.7: Principe de fonctionnement du L298N [20]

Le module dispose de plusieurs entrées de commande, notamment :

- Les entrées IN1 et IN2, utilisées pour définir le sens de rotation du moteur ;
- L'entrée ENA, permettant d'activer le moteur et de contrôler sa vitesse à l'aide d'un signal PWM.

Dans ce système, le signal PWM généré par le microcontrôleur permet de faire varier la vitesse du moteur, ce qui est utile pour assurer un retournement progressif et contrôlé des œufs.

Le L298N nécessite deux alimentations distinctes : une alimentation de puissance destinée au moteur (généralement 12 V), et une alimentation logique (5 V) pour la commande du circuit. Cette configuration permet d'isoler la partie commande de la partie puissance.

Ainsi, le module L298N joue un rôle essentiel dans le système, en assurant l'interface entre le microcontrôleur et le moteur de retournement.

3.2.6 Ecran d'affichage

Le système intègre un écran LCD 16x2 muni d'une interface I2C pour assurer la visualisation locale des principaux paramètres de fonctionnement. Cet afficheur permet à l'utilisateur de consulter directement les données mesurées, notamment la température, l'humidité, et messages des messages d'alerte. L'utilisation du module I2C réduit le nombre de broches nécessaires sur le microcontrôleur, ce qui facilite le câblage général du prototype.

L'intégration de cet écran constitue une interface homme-machine simple, pratique et adaptée à l'environnement de l'incubateur.

La Figure 3.8 montre l'image d'un écran LCD et le circuit I2C.



Figure 3.8: Ecran LCD avec l'interface I2C [21]

3.2.7 Source d'alimentation

L'alimentation du prototype repose sur une architecture multi-source conçue pour répondre aux besoins énergétiques du système tout en assurant la continuité de fonctionnement en cas d'indisponibilité d'une source principale. Le système peut être alimenté par le réseau électrique ou la batterie de secours de 12 V .

L'énergie disponible est distribuée aux différents sous-ensembles du prototype selon leurs besoins. Les actionneurs tels que le ventilateur, le moteur de retournement ou certains modules de puissance utilisent principalement le niveau 12 V, tandis qu'un convertisseur de tension (le regulateur LM7805) permet d'alimenter les circuits électroniques de commande en basse tension adaptée à l'ESP32 et aux périphériques associés. Cette architecture améliore la fiabilité globale du système

et limite les interruptions susceptibles de perturber le cycle d'incubation. La Figure 3.9 montre le schéma de câblage du système d'alimentation :

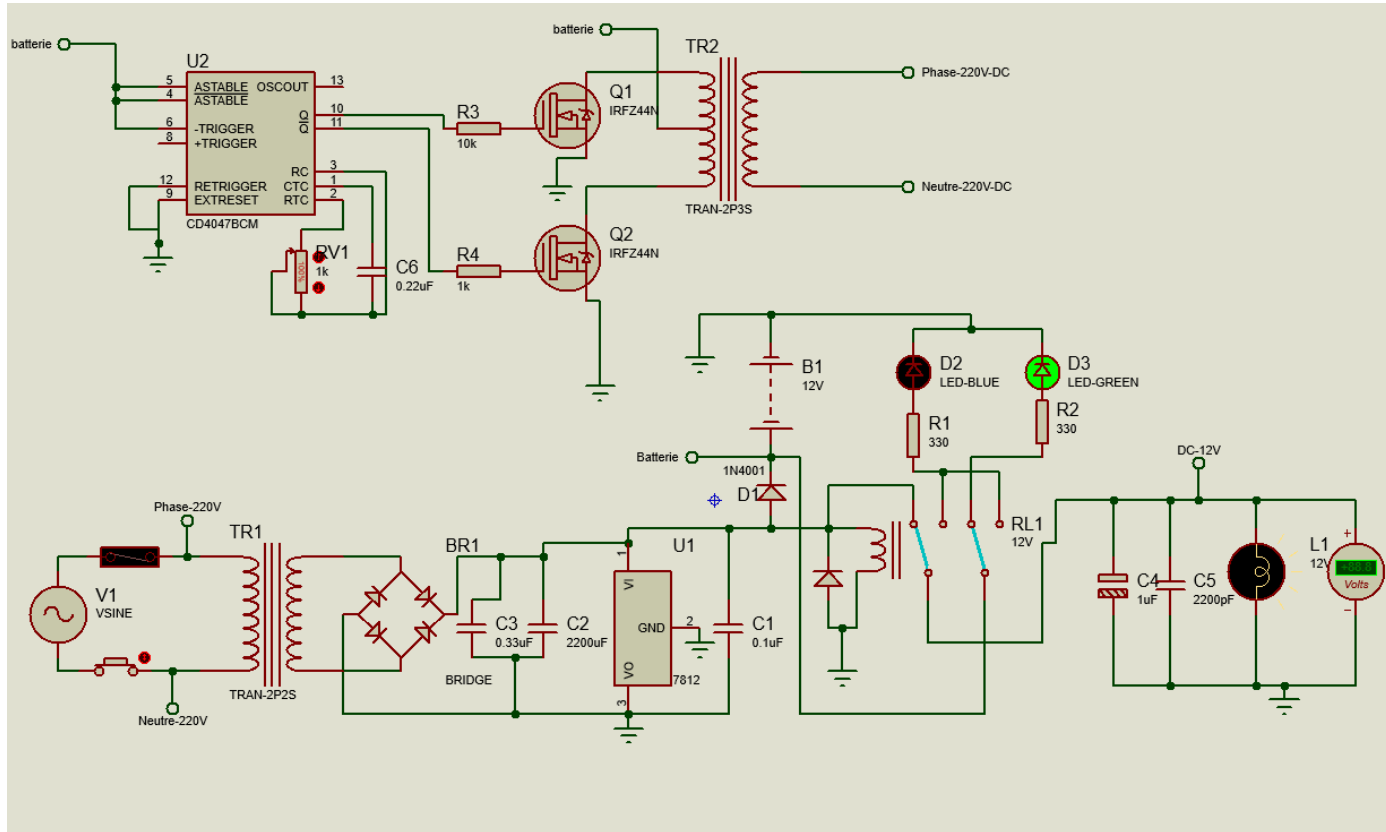


Figure 3.9: L'alimentation du circuit

3.2.8 Dimensionnement électrique du système

a) Le dimensionnement électrique du prototype

Le dimensionnement électrique du prototype a été effectué afin de vérifier que les sources d'alimentation retenues peuvent fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement simultané des différents composants. Le système comprend des équipements fonctionnant sous 12 V, notamment le ventilateur, le moteur de retournement et les circuits de puissance, ainsi que des éléments fonctionnant sous une tension plus faible, tels que l'ESP32, le capteur DHT22, l'écran LCD, les relais, les LED et le buzzer. Un convertisseur abaisseur de tension assure ainsi la conversion de la tension de 12 V vers une tension de 5 V adaptée aux circuits électroniques de commande. La puissance électrique consommée par chaque composant est déterminée à partir de la relation suivante:

$$P = U \times I$$

où P présente la puissance en watts, U la tension d'alimentation en volts et I le courant consommé en ampères. La puissance totale nécessaire au fonctionnement du prototype est obtenue en additionnant les puissances consommées par les différents éléments :

$$P_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^n P_i$$

Le Tableau 3-3 présente le bilan prévisionnel de puissance des principaux composants du système.

Tableau 3-3: Bilan prévisionnel de la puissance électrique du prototype

Composant	Tension d'alimentation	Courant	Puissance consommée	Nature de la valeur
Carte ESP32 avec Wi-Fi	5V continu	240 mA	1,20 W	Valeur en transmission Wi-Fi
Capteur DHT22	5V continu	1,5 mA	0,0075 W	Valeur fournie par le constructeur
Écran LCD 16×2 avec interface I2C	5V continu	20 mA	0,10 W	Valeur fournie par le constructeur
Deux modules relais	5V continu	144 mA	0,72 W	Environ 72 mA par relais
Buzzer actif	12V	30 mA	0,15 W	Valeur fournie par le constructeur
Trois LED de signalisation	3,3	30 mA	0,099 W	Environ 10 mA par LED
Petit ventilateur	12	150 mA	Valeur estimée	1,80 W
Moteur pas à pas de retournement	12	1A	12W	Valeur fournie par le constructeur
Lampe à incandescence	220V AC	455 mA	100W	Valeur nominale
Puissance sous Courant continu			16,98 W	Valeur maximale estimée à vide
Puissance totale sous AC			116,98 W	Valeur maximale estimée à vide en AC

La puissance totale des charges alimentées en courant continu est obtenue par :

$$P_{\text{courant Continu}} = 1,20 + 0,0075 + 0,10 + 0,72 + 0,15 + 0,099 + 1,80 + 12 + 0,90$$
$$P \approx 17 \text{ W}$$

Le courant demandé à l'alimentation de 12 V est alors estimé à :

$$I = \frac{17}{12}$$
$$I \approx 1,5 \text{ A}$$

Ainsi, l'alimentation de 12 V/100 watt pouvant théoriquement fournir un courant maximal de 8,33 A, elle est suffisante pour alimenter les charges du prototype. A ce qui concerne la lampe de chauffage, elle constitue une charge distincte alimentée directement sous une tension alternative de 220 V, Son courant nominal est déterminé par :

$$I_{\text{lampe}} = \frac{P_{\text{lampe}}}{U_{\text{lampe}}}$$
$$I_{\text{lampe}} = \frac{100}{220} \approx 0,455 \text{ A}$$

b) Le choix de la lampe

La lampe joue le rôle de source de chaleur dans l'incubateur. Elle doit fournir suffisamment de puissance thermique pour permettre à l'incubateur d'atteindre et de maintenir la température d'incubation, autour de 37,5 °C, malgré les pertes de chaleur à travers les parois et les ouvertures.

On peut estimer la puissance thermique nécessaire à partir de la relation :

$$P = \frac{Q}{t}$$

Mais ici il faudra tenir compte des pertes thermiques :

$$P_{\text{chauffage}} \geq P_{\text{pertes}}$$

Les pertes proviennent principalement :

- des parois de la caisse ;
- des ouvertures et de la ventilation ;
- des échanges d'air avec l'extérieur ;
- de la différence entre la température intérieure et la température ambiante.

Ainsi, pour une estimation plus précise des pertes par les parois :

$$P_{\text{pertes}} = U \times A \times (T_i - T_e)$$

où :

- U est le coefficient de transmission thermique des parois ;
- A est la surface totale des parois ;
- T_i est la température souhaitée dans l'incubateur ;
- T_e est la température ambiante.

Ainsi prenons exemple sur notre incubateur de volume approximatif de 1 m^3 , supposons les conditions suivantes :

- Dimensions : $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$
- Surface totale des parois :

$$A = 6 \times (1 \times 1) = 6 \text{ m}^2$$

Température intérieure souhaitée :

$$T_i = 37,5^\circ\text{C}$$

Température ambiante considérée :

$$T_e = 25^\circ\text{C}$$

Différence de température :

$$\Delta T = 37,5 - 25 = 12,5$$

Pour l'exemple, considérons un coefficient global de transmission thermique des parois de :

$$U = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La puissance perdue à travers les parois est alors :

$$P_{\text{parois}} = U \times A \times \Delta T$$

$$P_{\text{parois}} = 1 \times 6 \times 12,5$$

$$\boxed{P_{\text{parois}} = 75 \text{ W}}$$

Il faut également tenir compte des pertes liées à la ventilation, aux ouvertures de la caisse et aux échanges d'air. Supposons, à titre d'estimation, que ces pertes supplémentaires soient de l'ordre de 15 W. On obtient donc :

$$P_{\text{pertes}} = 75 + 15$$

$$\boxed{P_{\text{pertes}} \approx 90 \text{ W}}$$

Pour assurer une marge de sécurité permettant de compenser les variations de température ambiante et les pertes non prises en compte, on peut appliquer une marge d'environ 20 % :

$$P_{\text{chauffage}} = 90 \times 1,2$$

$$\boxed{P_{\text{chauffage}} \approx 108 \text{ W}}$$

La puissance normalisée peut donc être 100 W.

3.3 Logiciels et outils utilisés

La réalisation du prototype ne s'est pas limitée au choix des composants matériels. Elle a également nécessité l'utilisation de plusieurs outils logiciels intervenant aux différentes étapes de conception, de programmation, de simulation et de supervision du système.

3.3.1 Environnement de programmation

Le programme de commande du système a été développé à l'aide du logiciel Arduino IDE, compatible avec les cartes Arduino et ESP32. Cet environnement a permis l'écriture du code source, sa compilation, le téléversement vers le microcontrôleur ainsi que les essais de fonctionnement du programme embarqué. Son utilisation a été motivée par sa simplicité, sa large communauté d'utilisateurs et la disponibilité de nombreuses bibliothèques facilitant l'intégration du capteur DHT22, de l'écran LCD et des interfaces de communication.

3.3.2 Logiciel de simulation

La simulation du circuit embarqué a été réalisée à l'aide du logiciel Proteus Professional, spécialisé dans la conception et la simulation des systèmes électroniques. Cet outil a permis de représenter le schéma électrique du prototype, de tester certaines interactions entre composants et d'illustrer le fonctionnement global du système avant la réalisation pratique. L'utilisation de Proteus constitue un avantage important car elle permet de détecter certaines erreurs de conception et de valider les principes de fonctionnement en amont.

3.3.3 Les outils développement de l'application web

Pour assurer le suivi à distance de l'incubateur, une application web responsive a été développée. Elle est accessible depuis un ordinateur ou un téléphone connecté à Internet. Son interface principale présente la température, le taux d'humidité, l'état de connexion de l'ESP32, la source d'alimentation utilisée, le niveau de la batterie ainsi que le temps restant avant le prochain retournement des œufs. Elle permet également de visualiser l'évolution de la température et de l'humidité sous forme de graphiques.

L'application a été réalisée avec Next.js, basé sur la bibliothèque React, et le langage TypeScript. La mise en forme de l'interface a été effectuée avec Tailwind CSS.

Les données transmises par l'ESP32 sont reçues par des routes API développées avec Next.js, puis enregistrées dans une base de données PostgreSQL hébergée sur la plateforme Neon. L'outil Prisma assure la communication entre l'application et cette base de données. Le tableau de bord interroge périodiquement la base afin d'actualiser les informations affichées. Enfin, l'application a été déployée sur Vercel, ce qui permet d'y accéder à distance à partir d'un navigateur web.

Le principe général de fonctionnement peut être résumé comme suit : l'ESP32 collecte les mesures de température et d'humidité, les transmet par Wi-Fi à l'application, puis celles-ci sont enregistrées dans la base de données et affichées sur le tableau de bord. Cette solution facilite ainsi la surveillance à distance des conditions internes de l'incubateur. Simulation du système de retournement.

La simulation du système de retournement a été réalisée à l'aide du logiciel Proteus. Elle permet de valider le fonctionnement du moteur ainsi que la commande du module L298N par le microcontrôleur.

Cette simulation met en évidence :

- La commande du sens de rotation du moteur ;
- La variation de vitesse à l'aide du signal PWM ;
- Le bon fonctionnement global du système avant sa réalisation physique.

La figure 3-8 qui montre le schéma de câblage du système de retournement.

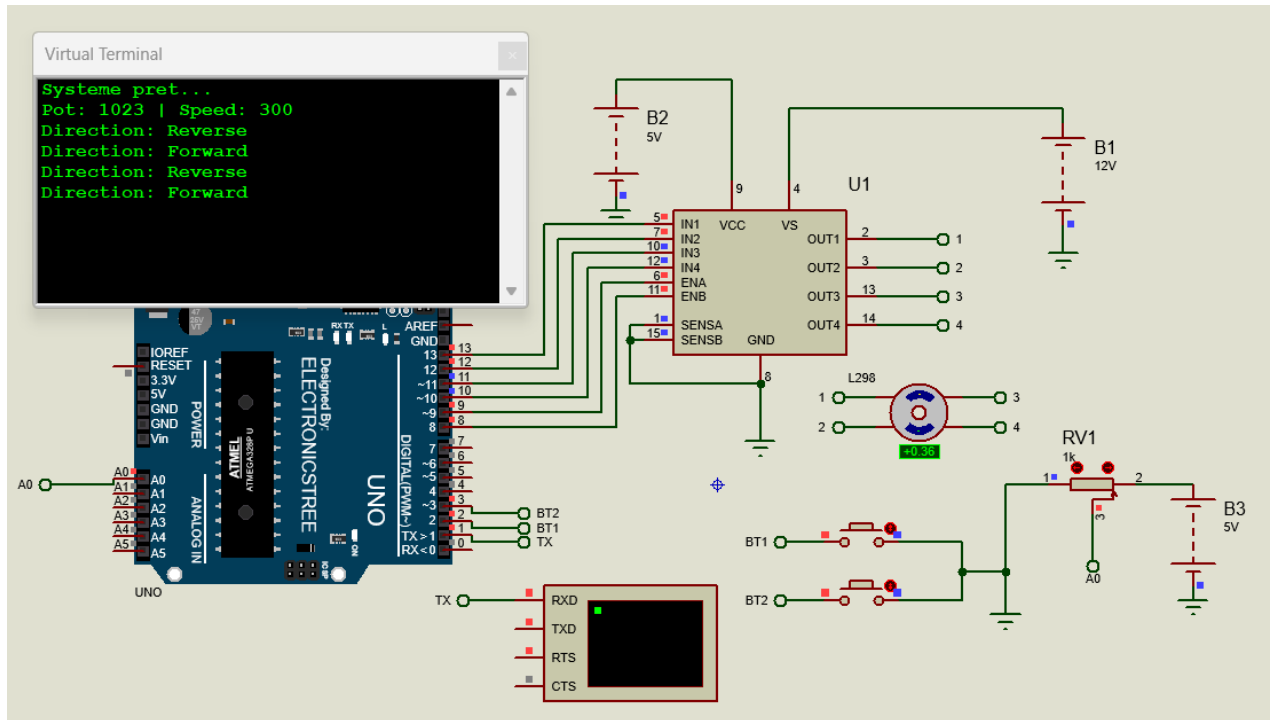


Figure 3.10: Simulation du système de retournement sous Proteus

3.3.4 Fonctionnement simulé

Le système proposé est un incubateur à œufs automatisé, conçu pour maintenir les conditions optimales d'incubation malgré la non-disponibilité de l'électricité observée. Son fonctionnement repose sur une alimentation multi-source composée du réseau électrique et d'une batterie de secours.

En fonctionnement normal, le réseau électrique alimente l'ensemble du système à travers un convertisseur AC-DC fournissant une tension continue de 12 V. Cette tension est ensuite distribuée aux différents actionneurs tandis qu'un convertisseur abaisseur produit une tension de 5 V destinée à l'alimentation de la carte ESP32 et des circuits de commande.

En cas d'interruption du réseau, un système de commutation automatique bascule instantanément vers la batterie afin d'assurer la continuité du fonctionnement sans interrompre le processus d'incubation. La carte ESP32 constitue l'unité centrale du système ; elle acquiert en permanence les mesures du capteur DHT22 afin de surveiller la température et l'humidité internes de la couveuse.

Lorsque la température descend en dessous de la valeur de consigne (37,5 °C), le microcontrôleur active automatiquement le dispositif de chauffage par l'intermédiaire d'un relais, puis le désactive lorsque la température atteint environ 38 °C. La ventilation est également commandée automatiquement afin d'assurer une répartition homogène de la chaleur dans l'enceinte. Le retournement périodique des œufs est assuré par un moteur pas à pas piloté via un module L298N selon une temporisation programmée, reproduisant ainsi les conditions naturelles d'incubation.

3.4 Réalisation de la maquette

3.4.1 Présentation générale de la maquette

La maquette constitue la matérialisation physique du système conçu. Elle regroupe les différents éléments matériels intégrés dans une structure représentant l'incubateur automatique proposé.

Cette réalisation a permis de passer du niveau conceptuel et simulé à une mise en œuvre concrète du prototype, en intégrant les fonctions principales de surveillance, de commande et de supervision.

LaFigure 3.11: le prototype réalisé.

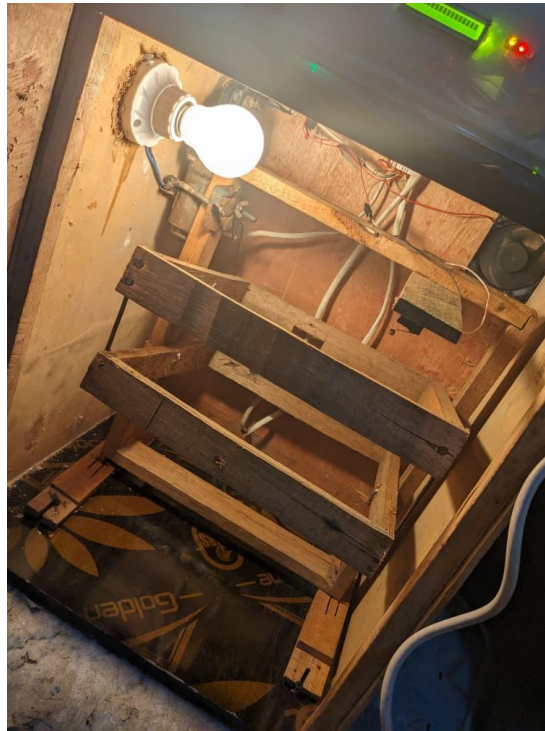


Figure 3.11: le prototype réalisé

3.4.2 Assemblage des composants

L'assemblage de la maquette a consisté à installer les différents composants selon l'architecture définie dans les chapitres précédents. Le microcontrôleur a été relié aux capteurs, aux actionneurs et aux interfaces de sortie, tandis que les circuits d'alimentation ont été adaptés aux exigences des différents éléments du système.

3.4.3 Présentation physique du prototype

Le prototype réalisé comprend une structure d'incubation, un système de commande embarqué, un dispositif d'affichage local, un mécanisme de retournement, un système de chauffage, un système de ventilation ainsi qu'une interface de supervision .

L'ensemble constitue une maquette fonctionnelle illustrant les principales caractéristiques de l'incubateur automatique à alimentation multi-source proposé dans ce travail.

3.4.4 Présentation de l'application web de superposition

Une application web de supervision a été développée avec React afin de fournir à l'utilisateur une interface simple pour consulter les informations relatives au fonctionnement de l'incubateur.

L'application comporte une page d'authentification permettant de contrôler l'accès au système ainsi qu'un tableau de bord adapté à l'affichage sur un appareil mobile. La Figure 3.12: Présentation de l'application.

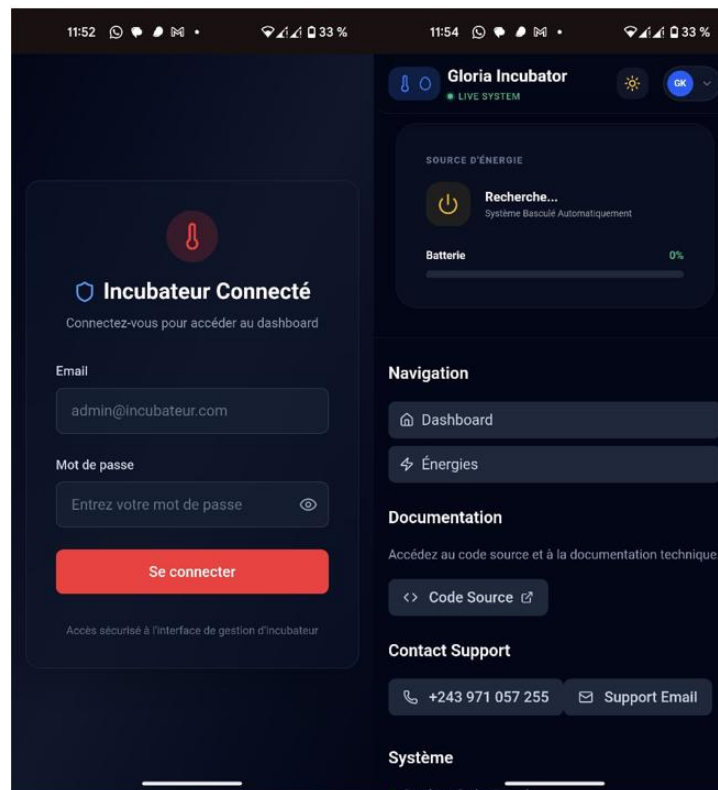


Figure 3.12: Présentation de l'application

3.5 Tests effectués et résultats obtenus

3.5.1 Tests réalisés

Afin d'évaluer le fonctionnement du prototype, plusieurs tests ont été effectués sur les principales fonctions du système. Ces essais ont porté notamment sur la lecture des paramètres mesurés, l'affichage local, l'activation du chauffage, le fonctionnement du ventilateur, le déclenchement de l'alerte sonore, le retournement automatique des œufs et la transmission des données vers l'application mobile.



Figure 3.13: test réalisé sur le prototype

Ces tests avaient pour objectif de vérifier la cohérence du comportement du système par rapport aux fonctions définies lors de la phase de conception.

3.5.2 Présentation synthétique des résultats

Les résultats obtenus montrent que le prototype répond globalement aux objectifs essentiels fixés au départ. Il permet la surveillance des paramètres internes, la commande automatisée de certaines fonctions et la présentation des informations à l'utilisateur. L'ensemble du système met en évidence l'intérêt de l'approche retenue pour améliorer l'incubation artificielle dans un contexte marqué par l'instabilité énergétique.

3.6 Discussion des résultats et limites

L'analyse des résultats obtenus montre que le prototype développé constitue une solution pertinente au regard des objectifs du travail. L'intégration d'une commande embarquée, d'un système d'affichage, d'un mécanisme de surveillance et d'une application mobile démontre la faisabilité d'un incubateur automatique plus évolué et mieux adapté au contexte local.

Toutefois, certaines limites doivent être soulignées. Comme tout prototype académique, le système réalisé ne prétend pas encore représenter une solution industrielle complète. Certaines fonctions peuvent avoir été validées partiellement, et l'optimisation de certains sous-ensembles, notamment l'alimentation, la précision des mesures, la robustesse mécanique ou la gestion avancée des alertes, peut encore être améliorée.

Ces limites n'enlèvent pas l'intérêt du travail réalisé, mais montrent au contraire des pistes concrètes d'amélioration pour de futurs développements.

3.7 Conclusion partielle

Ce chapitre a présenté la réalisation pratique du système proposé à travers le choix des composants matériels et logiciels, la simulation de la partie embarquée, la présentation de l'application mobile ainsi que la réalisation de la maquette. Les essais effectués ont permis de mettre en évidence la faisabilité du prototype et de confirmer l'intérêt de l'approche adoptée. Malgré certaines limites à un projet académique, les résultats obtenus montrent que le système conçu constitue une base sérieuse pour le développement d'un incubateur automatique à alimentation multi-source et suivi à distance.

Conclusion Generale

Au terme de ce travail portant sur la réalisation d'un incubateur automatique doté d'une alimentation de secours et d'un système de suivi à distance via une application web, il convient de rappeler que l'objectif principal était de proposer une solution permettant d'améliorer les conditions d'incubation des œufs tout en réduisant les interventions manuelles et les conséquences des coupures d'électricité.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par présenter les notions générales relatives à l'incubation artificielle, les différents paramètres nécessaires au développement de l'embryon ainsi que les principaux éléments constituant un incubateur. Nous avons ensuite procédé à l'analyse des besoins et à la conception du système afin de déterminer son fonctionnement général et les différentes tâches qu'il devait assurer.

La réalisation du prototype a reposé principalement sur l'utilisation d'une carte ESP32, chargée de recevoir les informations provenant du capteur DHT22 et de commander les différents actionneurs. Le système permet ainsi de surveiller la température et l'humidité à l'intérieur de l'incubateur, de commander automatiquement le chauffage et la ventilation, d'assurer le retournement périodique des œufs et d'afficher les informations importantes sur un écran LCD. L'utilisation de l'ESP32 permet également de transmettre les données vers une application web afin que l'utilisateur puisse suivre à distance le fonctionnement de l'incubateur.

Une alimentation de secours par batterie a également été intégrée au système. Elle permet de maintenir le fonctionnement de l'incubateur lorsque la source principale devient indisponible. Cette partie constitue un élément important du projet, particulièrement dans un environnement où les coupures d'électricité sont fréquentes et peuvent perturber le processus d'incubation.

Les simulations et les différents essais réalisés ont permis de vérifier le fonctionnement des principales parties du prototype. Le système est notamment capable de lire les valeurs de température et d'humidité, de commander le chauffage selon les seuils définis, d'assurer la ventilation, d'actionner le mécanisme de retournement et de signaler certaines situations anormales. Ces résultats montrent que la solution proposée peut contribuer à améliorer la surveillance et l'automatisation du processus d'incubation.

Cependant, certaines améliorations restent encore possibles. Il serait notamment nécessaire d'effectuer des essais pendant plusieurs cycles complets d'incubation afin d'évaluer le taux réel d'éclosion, de renforcer le mécanisme de retournement, d'améliorer l'autonomie de la batterie et d'intégrer un système automatique de régulation de l'humidité.

En définitive, la réalisation de ce projet nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises dans les domaines de l'électronique, de l'informatique et des systèmes embarqués. Malgré les difficultés rencontrées au cours de sa réalisation, les objectifs essentiels ont été atteints et le prototype obtenu constitue une base qui pourra être améliorée dans les travaux futurs.

Bibliographie

- [1] World Population Review, «Global Hunger Index by Country 2026,» 2026.
- [2] «Roughand tumble farmhouse,» [En ligne]. Available: <https://roughandtumblefarmhouse.com/what-to-do-with-your-incubator-if-the-power-goes-out/>. [Accès le 12 mars 2026].
- [3] M. S. R. e. al., Natural Incubation and Broody Hen Management Practices in Barishal District Bangladesh, 2023.
- [4] FAO, «Chapitre1: Production en aviculture familiale».
- [5] M. O. & B. D. D. North, Commercial Chicken Production Manual. Springer Science & Business Media., (1990).
- [6] [En ligne]. Available: www.poulailler.org.
- [7] «Nutrixeal-info,» [En ligne]. Available: <https://nutrixeal-info.fr/index/membrane-oeuf-de-poule/>.
- [8] e. a. Nico van Waneningen, L'incubation des oeufs par les poules et en couveuse, 2004.
- [9] C. KANGORO, CONCEPTION ET REALISATION D'UNE COUVEUSE ELECTRIQUE POUR DES OEUFs DE VOLAILLE, 2012-2013.
- [10] «Installation Renovation electrique,» [En ligne]. Available: <https://www.installation-renovation-electrique.com/glossaire-electricite/alimentation-secteur/>. [Accès le 27 2 2026].
- [11] N. T. Amadou, GÉNÉRALITÉS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE, -LASES/FST-UCAD: <https://www.mcours.net/cours/pdf/kha/khacoursclie39.pdf>, 2013.
- [12] «tandfonline,» [En ligne]. Available: www.tandfonline.com. [Accès le 12 mars 2026].
- [13] «catpowerdesign,» [En ligne]. Available: www.catpowerdesign.fr.
- [14] «Initiation Arduino,» [En ligne]. Available: <http://fr.flossmanuals.net/arduino/index>.
- [15] hwlibre@googlegroups.com, «Sections,» [En ligne]. Available: <https://fr.hwlibre.com/sections/>. [Accès le 28 2 2026].
- [16] "forum arduino," [Online]. Available: forum.arduino.cc.

- [17] «Oelectronics,» [En ligne]. Available: <https://olelectronics.in/product/9v-piezo-buzzer/>.
- [18] «Alamy,» [En ligne]. Available: <https://www.alamyimages.fr>. [Accès le 2 mars 2025].
- [19] «Mischianti_Electronics, Embedded, 3D Printing & Coding,» [En ligne]. Available: <https://mischianti.org/>. [Accès le 10 avril 2026].
- [20] «PassionElectronique,» [En ligne]. Available: passionelectronique.com.
- [21] «Circuit Designer Docs,» [En ligne]. Available: <https://docs.circuitdesigner.com/>. [Accès le 10 Avril 2026].
- [22] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [23] «<https://blog.exacompare.fr/solution-energetique/thermostat/>,» *EXACOMPARE*, 2025.
- [24] F. poultry, L'elevage dans le monde en 2011 Contribution de l'elevage a la securité alimentaire.
- [25] «Electronics, DiGI,» [En ligne]. Available: <https://www.digi-electronics.fr/fr/blogs/relays-guide-working-principle-types-specifications-applications/161.html>. [Accès le 27 2 2025].
- [26] A. Lisa, Conception et Réalisation d'un Système de Supervision et de Commande IoT pour une Infrastructure Électrique Hybride, 2024 /2025.
- [27] «Hardwarelibre,» [En ligne]. Available: <https://fr.hwlibre.com/Syst%C3%A8mes-embarqu%C3%A9s%C2%A0%3A-fonctionnement-et-exemples/>. [Accès le 28 2 2026].
- [28] «ALLDATASHEET.COM,» [En ligne]. Available: <https://www.alldatasheet.com/>. [Accès le 28 2 2026].
- [29] «pngtree,» [En ligne]. Available: https://pngtree.com/freepng/solar-panels-isolated-on-white-background_20393947.html. [Accès le 12 mars 2026].
- [30] «eTechnophiles,» [En ligne]. Available: www.etechnophiles.com.
- [31] "alexnlld," [Online]. Available: <https://alexnlld.com/>. [Accessed 12 mars 2026].

Annexe A

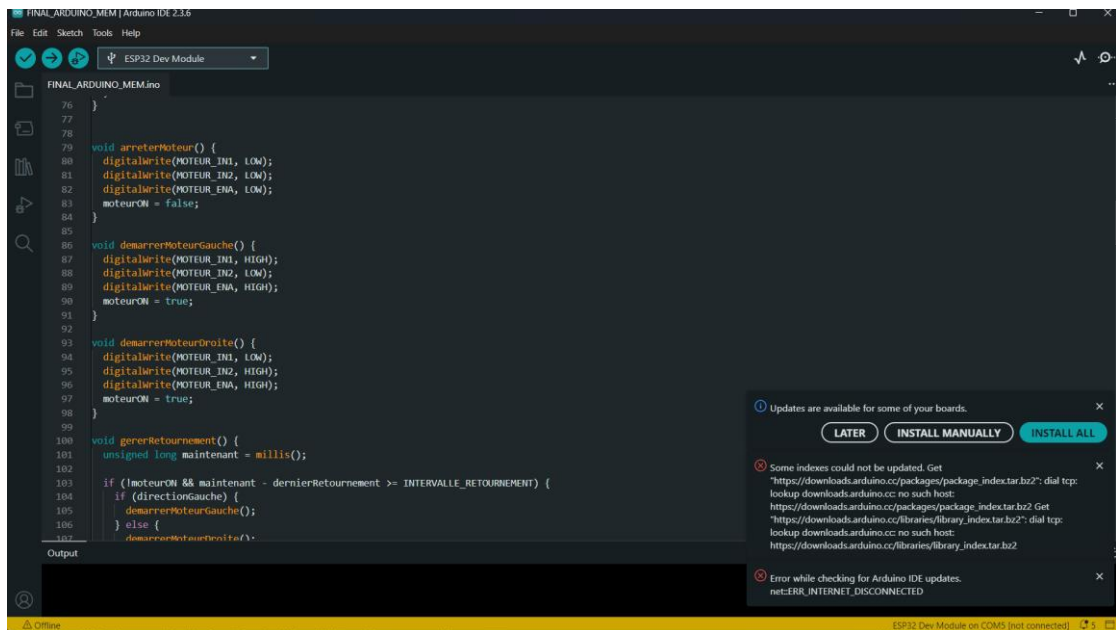


Figure 0.1: l'interface du logiciel Arduino

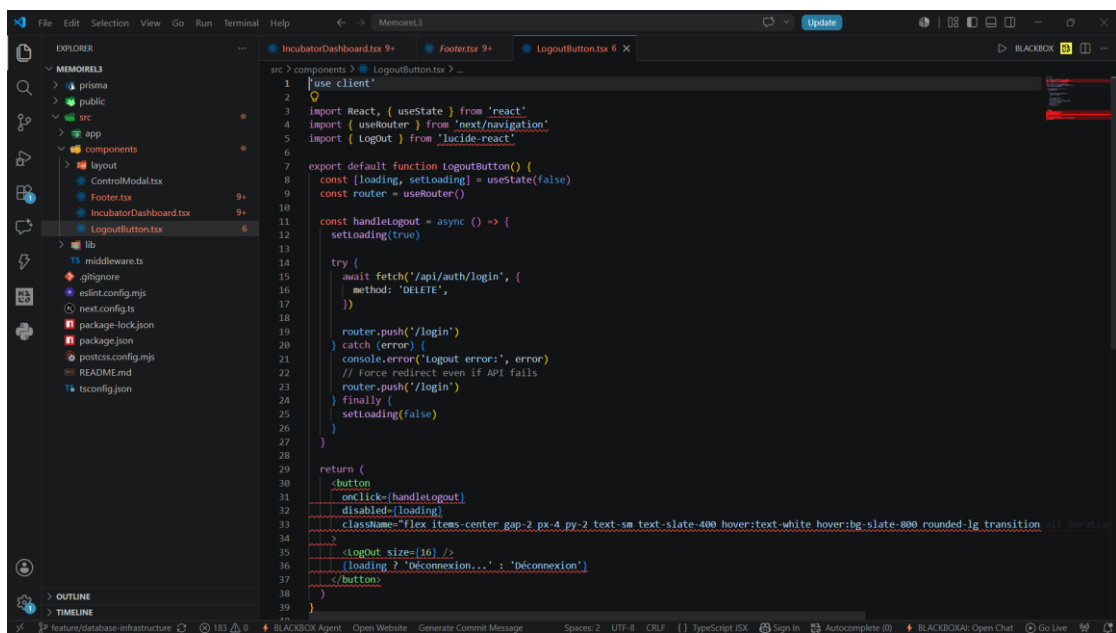


Figure 0.2: Implementation de l'application

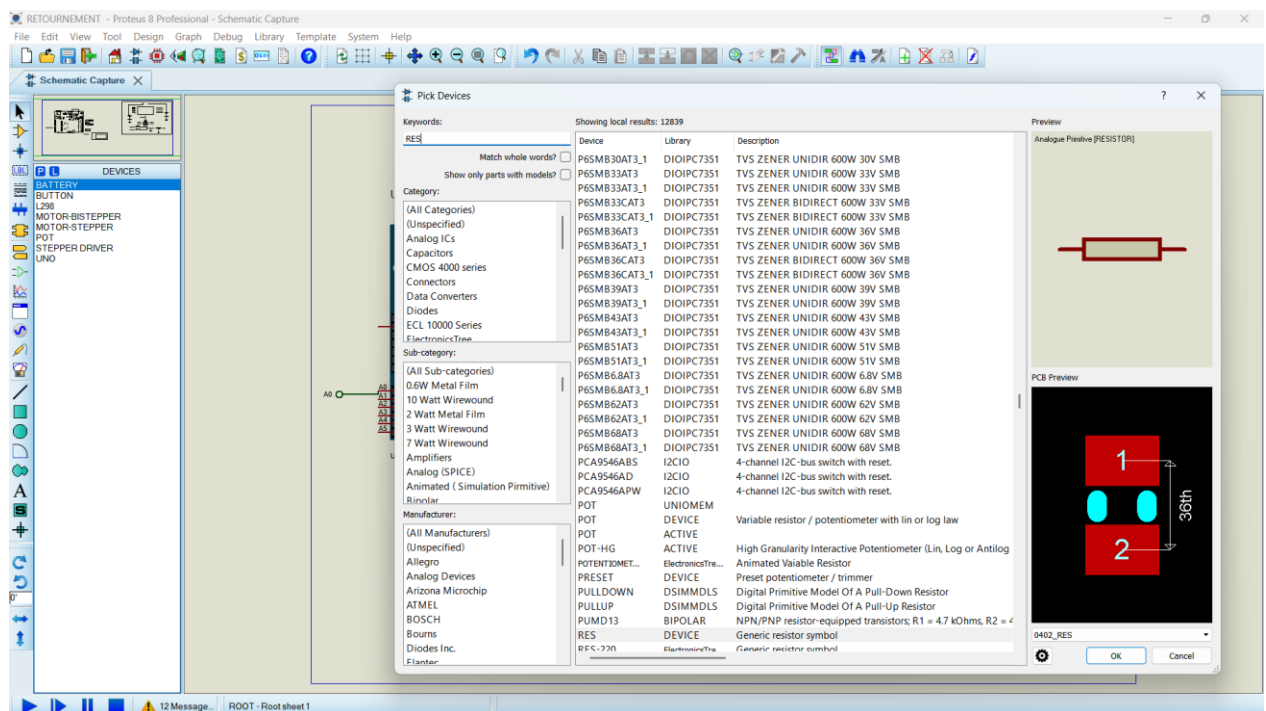


Figure 0.3: Interface du logiciel Proteus