

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electronique

Spécialité : Systèmes Embarqués

Par

➤ **Benhalladja Nassim**

➤ **Bouakaz Yaakoub**

Intitulé

***Systèmes intelligents de contrôle climatique des bâtiments
avicoles basés sur des réseaux de capteurs sans fil***

Soutenu le : 10/11/2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Brahimi Abdelhalim</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Benameur Ahmed</i>	<i>MAA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Yousfi Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Saidani Okba</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belhadad Yahya</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Boualem Boukezata</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

REMERCIEMENT

Nous tenons avant tout à remercier Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent à Monsieur Ahmed Benameur, notre encadrant, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à Monsieur Saidani Okba pour son aide, ses orientations et ses conseils constructifs lors de la rédaction de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur Yousfi Abderrahim, chef d'option, pour son suivi et son soutien tout au long de notre parcours académique.

Enfin, nous remercions l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi ainsi que tous les enseignants du Département d'Électronique, en particulier ceux de la spécialité Systèmes Embarqués, pour la qualité de leur enseignement et leur engagement envers la réussite des étudiants.

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes très chers parents, dont les prières constantes, le soutien moral et les encouragements m'ont permis d'avancer et de devenir la personne que je suis aujourd'hui.

À la mémoire de ma chère grand-mère, رحمها الله, dont l'amour et la sagesse continuent de m'inspirer chaque jour.

À toute ma famille, pour leur présence bienveillante et leur soutien indéfectible.

À mes amis Yaakoub, Lokmane, et tous les camarades qui ont partagé cette aventure humaine et académique.

À toute la promotion Systèmes Embarqués 2025, avec laquelle j'ai eu le plaisir d'apprendre, de collaborer et d'évoluer.

Et enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, je vous adresse ma sincère gratitude.

merci.

Nassim benhalladja

DEDICACE

Je dédie ce travail à ma chère famille, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours.

À mes parents, piliers de ma réussite, pour leur confiance et leurs encouragements constants.

À mes frères et sœurs, pour leur présence et leur motivation.

À mes amis, compagnons de route fidèles, pour les moments de partage, d'entraide et de bonne humeur qui ont marqué ces années d'études.

À toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont soutenu de près ou de loin, je vous exprime ma profonde reconnaissance.

Yakoub Bouaakaz

Table des matières

ملخص.....	vi
Résumé.....	vii
Abstract.....	viii
Liste des symboles.....	xi
Liste des abréviations.....	xiii
Liste des Figures.....	xv
Liste des tableaux.....	xxi
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I : État de l'art

I.1. Introduction	6
I.2. Évolution et contexte de l'aviculture en Algérie.....	6
I.3. Principes et caractéristiques des bâtiments avicoles	8
I.3.1. Définition et types de bâtiments avicoles.....	8
I.3.2. Conception architecturale des bâtiments avicoles	9
I.3.2.1 Implantation des bâtiments.....	9
I.3.2.2 Dimensions et capacité des bâtiments.....	10
I.3.3. Équipements techniques d'un bâtiment avicole.....	10
I.3.3.1. Abreuvoirs à cloche.....	10
I.3.3.2. Citerne d'eau.....	11
I.3.3.3. Silo d'aliments.....	12
I.3.3.4. Ventilateurs.....	12
I.3.3.5. Chauffages.....	13
I.3.3.6. Thermomètres.....	14
I.3.3.7. Lampes	14
I.3.3.8. Trappes et fenêtres d'aération	15

Table des matières

I.4. Paramètres environnementaux à contrôler	15
I.4.1. Température	15
I.4.2. Humidité	16
I.4.3. Ventilation	17
I.4.3. Chauffage	17
I.5. Technologies de contrôle climatique	18
I.5.1. Approche classique	18
I.5.2. Approche moderne et automatisée	18
I.6. Réseaux de capteurs sans fil appliqués à l'aviculture	19
I.6.1. Définition et principes de base.....	19
I.6.2. Architecture typique	20
I.6.3. Types de capteurs utilisés	20
I.6.4. Avantages pour l'élevage avicole	20
I.7. Conclusion.....	21

Bibliographie chapitre I

CHAPITRE II : Conception du système intelligent de contrôle climatique

II .1. Introduction.....	25
II .2. Architecture générale du système	25
II .3. Partie matérielle	26
II .3.1. Présentation d'Arduino.....	26
II .3.1 Définition.....	26
II.3.2 Utilisation de l'ATmega328P avec l'Arduino.....	27

Table des matières

II .3.3. Modules et composants d'entrée-sortie	28
II.3.3.1. Capteur de température et d'humidité DHT22.....	28
II.3.3.2. Capteur de température DS18B20.....	29
II.3.3.3. Module de communication sans fil nRF24L01	30
II.3.3.4. Module GSM A7670C	31
II .4. Partie logicielle	32
II .4.1 Environnement de développement Arduino IDE	32
II .4.2 Environnement de développement Android Studio	32
II .5. Technologies de communication utilisées	34
II .5.1 Communication locale par radiofréquence (RF).....	34
II .5.2 Communication à distance via GSM	37
II .6. Conclusion.....	39

Bibliographie chapitre II

CHAPITRE III : Réalisation, simulation et tests du système

III.1. Introduction.....	43
III.2. Simulation et réalisation du système	43
III.2.1. Simulation sous Proteus	43
III.2.2. Conception et réalisation du circuit imprimé	44
III.3. Application mobile : Controlify	46
III.3.1. Tableau de bord	46
III.3.2. Panneau de contrôle	47
III.3.3. Paramètres	48
III.3.4. Historique	50

Table des matières

III.3.5. Discussion	51
III.4. Déploiement et tests dans un élevage avicole réel	51
III.4.1. Installation et configuration	51
III.4.2. Tests de fonctionnement	52
III.4.3. Retour d'expérience et observations	53
III.5. Conclusion.....	54
Bibliographie chapitre III	
Conclusion générale.....	56

تُعد تربية الدواجن من القطاعات الحيوية لضمان الأمن الغذائي في الجزائر، غير أنّ الظروف المناخية القاسية، خصوصاً موجات الحرارة المرتفعة، تسبّب خسائر اقتصادية كبيرة للمربين. يهدف هذا البحث إلى تصميم وتنفيذ نظام ذكي للتحكم المناخي داخل مباني تربية الدواجن. يعتمد النظام على المتحكم الدقيق **ATmega328P**، وشبكة من الحساسات اللاسلكية باستخدام وحدات **nRF24L01** للاتصال المحلي، بالإضافة إلى وحدة **A7670C** للتواصل عن بُعد عبر الرسائل القصيرة **SMS**. تُستخدم حساسات **DHT22** و **DS18B20** لقياس درجة الحرارة والرطوبة بدقة. يتيح النظام مراقبة فورية، وتنظيمًا تلقائيًا للمناخ الداخلي (التهوية، التدفئة، الإضاءة)، مع إرسال تنبيهات في حال حدوث خلل. كما تم تطوير تطبيق **Android** لتسهيل المراقبة والتحكم عن بُعد. أثبتت النتائج فعالية النظام وبساطته وتكلفته المنخفضة، مما يجعله مناسبًا للمزارع الصغيرة والمتوسطة.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة المدمجة، تربية الدواجن، الحساسات اللاسلكية، أردوينو، نظام التحكم المناخي.

Résumé

L'aviculture constitue un secteur essentiel pour la sécurité alimentaire nationale en Algérie. Cependant, les conditions climatiques extrêmes, marquées par des vagues de chaleur fréquentes, entraînent des pertes économiques considérables dans les exploitations avicoles. Ce mémoire propose la conception et la réalisation d'un système intelligent de contrôle climatique destiné aux bâtiments avicoles. Ce système repose sur des microcontrôleurs ATmega328P et sur un réseau de capteurs sans fil basé sur les modules **nRF24L01** pour la communication locale, associés à un module **A7670C** pour la supervision à distance via **SMS**. Les capteurs **DHT22** et **DS18B20** assurent la mesure précise de la température et de l'humidité. L'ensemble permet un suivi en temps réel, une régulation automatique du climat intérieur (ventilation, chauffage, éclairage) et l'envoi d'alertes en cas d'anomalie. Une application mobile Android a été développée pour faciliter la surveillance et le contrôle à distance. Les résultats obtenus démontrent la fiabilité, la simplicité et le faible coût du système proposé, le rendant adapté aux petites et moyennes exploitations avicoles.

Mots clés : Systèmes embarqués, Aviculture, Capteurs sans fil, Arduino, GSM, Contrôle climatique.

Abstract

Poultry farming is a key sector for food security in Algeria. However, extreme climatic conditions, especially recurrent heat waves, cause significant economic losses in poultry farms. This thesis presents the design and implementation of an intelligent climate control system for poultry houses. The proposed system is based on **ATmega328P** microcontrollers and a wireless sensor network using **nRF24L01** modules for local communication, combined with a **A7670C** GSM module for remote supervision via **SMS**. **DHT22** and **DS18B20** sensors are used for accurate temperature and humidity monitoring. The system enables real-time data acquisition, automatic environmental regulation (ventilation, heating, lighting), and alert transmission in case of abnormal conditions. A dedicated Android mobile application was developed to enhance user interaction and remote control. The obtained results confirm the system's reliability, low cost, and suitability for small and medium-scale poultry farms.

Keywords: Embedded systems, Poultry farming, Wireless sensors, Arduino, GSM, Climate control.

Liste des symboles

E_g	Gap d'énergie interdite d'un matériau	eV
M_p	Mobilité des trous	cm ² /V·s
AM	Masse d'air (Air Mass)	—
T	Température	°C
H ou RH	Humidité relative	%
V	Tension électrique	Volt (V)
I	Courant électrique	Ampère (A)
R	Résistance électrique	Ohm (Ω)
F	Fréquence	Hz
P	Puissance	Watt (W)
m³/h	Débit volumique d'air	mètre cube par heure
T	Temps	seconde (s)
L	Longueur ou distance	mètre (m)
°C/min	Variation de température par minute	—
CO₂	Dioxyde de carbone	—
NH₃	Ammoniac	—

Liste des abréviations

RF	Radiofréquence
ISM	Industrial, Scientific and Medical (bande de fréquences industrielle, scientifique et médicale)
GSM	Global System for Mobile Communications (Système mondial de communication mobile)
GPRS	General Packet Radio Service (Service général de radiocommunication par paquets)
SMS	Short Message Service (Service de messages courts)
MS	Mobile Station (Station mobile)
BSS	Base Station Subsystem (Sous-système de station de base)
BTS	Base Transceiver Station (Station de base émettrice-réceptrice)
BSC	Base Station Controller (Contrôleur de station de base)
NSS	Network Switching Subsystem (Sous-système de commutation de réseau)
HLR	Home Location Register (Registre de localisation d'abonné)
VLR	Visitor Location Register (Registre de localisation visiteur)
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Récepteur/transmetteur asynchrone universel)
TTL	Transistor-Transistor Logic (Logique transistor-transistor)
DC	Courant continu (Direct Current)
AC	Courant alternatif (Alternating Current)
AT	Attention (préfixe des commandes de communication du module GSM)
IDE	Integrated Development Environment (Environnement de développement intégré)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface série périphérique)
RISC	Reduced Instruction Set Computer (Ordinateur à jeu d'instructions réduit)
RH	Relative Humidity (Humidité relative)
DHT	Digital Humidity and Temperature (Capteur numérique d'humidité et de température)

Liste des abréviations

RF24	Bibliothèque de communication pour le module nRF24L01
NRF24L01	Module de communication radio sans fil 2,4 GHz
A7670C	Module GSM/GPRS quadri-bande
ATmega328P	Microcontrôleur 8 bits utilisé sur la carte Arduino Uno
UNO	Carte Arduino basée sur le microcontrôleur ATmega328P
USB	Universal Serial Bus (Bus série universel)
XML	eXtensible Markup Language (Langage de balisage extensible)
ACK	Acknowledgement (Accusé de réception)
CRC	Cyclic Redundancy Check (Contrôle de redondance cyclique)
MHz	Mégahertz (Unité de fréquence)
GHz	Gigahertz (Unité de fréquence)
Ma	Milliampère
V	Volt
°C	Degré Celsius
%	Pourcentage
Mb/s ou Mbps	Mégabit par seconde (Débit de données)

Liste des Figures

CHAPITRE I : État de l'art

Figure I.1 : Exemple d'un bâtiment avicole clair avec ventilation naturelle.

Figure I.2 : Exemple d'un bâtiment avicole obscur entièrement mécanisé.

Figure I.3 : Schéma architectural typique d'un bâtiment avicole.

Figure I.4 : Abreuvoir à cloche utilisé dans les bâtiments avicoles.

Figure I.5 : Citerne d'eau pour l'approvisionnement et l'hygiène.

Figure I.6 : Silo d'aliments destiné au stockage sécurisé de la nourriture.

Figure I.7 : Ventilateurs utilisés pour la ventilation mécanique.

Figure I.8 : Systèmes de chauffage à rayonnement infrarouge

Figure I.9 : Thermomètre pour la surveillance thermique interne.

Figure I.10 : Lampes d'éclairage et de chauffage pour les volailles.

Figure I.11 : Trappes et fenêtres d'aération pour la circulation de l'air.

CHAPITRE II : Conception du système intelligent de contrôle climatique

Figure II.1 : Architecture générale du système intelligent de contrôle climatique.

Figure II.2 : Carte Arduino Uno.

Figure II.3 : Microcontrôleur ATmega328P – Brochage.

Figure II.4 : Capteur de température et d'humidité DHT22.

Figure II.5 : Capteur de température DS18B20 – Sonde étanche.

Figure II.6 : Module nRF24L01 – Émetteur-récepteur RF 2,4 GHz.

Figure II.7 : Module GSM A7670C.

Figure II.8 : Vue générale de l'environnement Arduino IDE.

Figure II.9 : Interface de l'environnement Android Studio.

Liste des Figures

Figure II.10 : Répartition des canaux de communication RF utilisés par le nRF24L01.

Figure II.11 : Exemple de topologie en étoile pour un réseau de capteurs nRF24L01.

Figure II.12 : Fonctionnement du protocole Enhanced ShockBurst.

Figure II.13 : Schéma fonctionnel simplifié du réseau GSM, incluant MS, BTS, BSC, et NSS.

CHAPITRE III : Résultats de simulation numérique et interprétation

Figure III.1 : Simulation du système intelligent de contrôle de température sous Proteus.

Figure III.2: Circuit imprimé final assemblé de l'unité centrale de commande.

Figure III.3: Circuit imprimé final assemblé du nœud capteur sans fil.

Figure III.4: Interface du tableau de bord de l'application Controlify.

Figure III.5: Interface de contrôle des dispositifs et configuration des relais.

Figure III.6: Menu des paramètres de l'application Controlify.

Figure III.7: Exemple d'historique des commandes.

Figure III.8: Installation de l'unité centrale et du nœud capteur dans le bâtiment avicole.

Figure III.9: Exemple de fonctionnement du système lors des tests sur le terrain.

CHAPITRE I : État de l'art

Tableau II.1 : Évolution quantitative de la production de viande blanche en Algérie.

Tableau II.2 : Température idéale par âge.

Tableau II.3 : Humidité optimale selon l'âge.

Tableau II.4 : Taux de ventilation minimale.

Tableau II.5 : Programme lumineux recommandé.



Introduction Générale

Introduction Générale

L'aviculture en Algérie, bien que fondamentale pour la sécurité alimentaire nationale, fait face à des obstacles considérables, accentués par les conditions climatiques extrêmes. Les vagues de chaleur sans précédent, dont les températures ont parfois excédé 48°C, ont provoqué des pertes considérables dans les exploitations avicoles. À titre d'illustration, en juillet 2023, un aviculteur de Bouira a vu disparaître 4000 dindonneaux, une perte estimée à plusieurs milliards de centimes, en raison de températures extrêmes. Ce drame met en exergue la vulnérabilité des petits éleveurs face aux aléas climatiques, un sujet qui suscite de nombreuses interrogations quant à la capacité des populations à s'adapter et à surmonter les défis environnementaux [1].

Ces conditions extrêmes ont conduit un grand nombre d'aviculteurs à interrompre leurs activités, étant dans l'incapacité de faire face aux risques accrus de mortalité animale et aux coûts supplémentaires inhérents à la mise en place de systèmes de refroidissement efficaces. La situation est d'autant plus critique que la majorité des éleveurs exercent leur activité en dehors de tout cadre réglementaire, sans bénéficier d'un accès aux subventions publiques ou aux infrastructures modernes qui seraient pourtant nécessaires pour atténuer les effets des vagues de chaleur. Les répercussions de ces perturbations ne se limitent pas uniquement aux pertes économiques subies par les éleveurs. Il a été démontré que les fluctuations du prix de la viande blanche et des œufs sont attribuables à des facteurs endogènes, notamment à des variations directes sur le marché. Ces fluctuations ont pour effet d'exclure une partie de la population de l'accès à des produits essentiels, rendus inaccessibles en raison de leur augmentation significative du prix [2-3].

Dans le contexte des défis actuels, il apparaît comme une nécessité impérieuse de procéder à la modernisation des méthodes de gestion des élevages avicoles en Algérie. Dans le contexte actuel, marqué par une prise de conscience écologique accrue, l'intégration de technologies intelligentes pour le contrôle des paramètres environnementaux, tels que la température et l'humidité, devient une nécessité incontournable. Cette démarche s'avère essentielle pour assurer la pérennité du secteur et protéger les moyens de subsistance des éleveurs.

2. Problématique :

En dépit de l'importance stratégique de l'aviculture en Algérie, le secteur est confronté à des défis majeurs en matière de gestion des paramètres environnementaux au sein des exploitations avicoles. La majorité des exploitations avicoles fonctionnent encore de manière traditionnelle, avec une surveillance manuelle de la température, de l'humidité, de l'éclairage et de l'alimentation en eau. Cette approche présente plusieurs limitations : elle est longue, sujette aux erreurs humaines et ne

Introduction Générale

permet pas une réactivité suffisante face aux variations rapides des conditions climatiques.

Les répercussions de cette gestion désuète sont diverses : accroissement du taux de mortalité des volailles, diminution de la productivité, surconsommation d'énergie et d'eau, et, en définitive, pertes économiques notables pour les éleveurs. En outre, l'absence de systèmes d'alerte précoce limite la capacité à intervenir rapidement en cas de détection de conditions défavorables ou de maladies, conduisant à une exacerbation des risques sanitaires.

Dans un contexte où les conditions climatiques deviennent de plus en plus imprévisibles et extrêmes, comme l'illustrent les récentes vagues de chaleur ayant causé des pertes massives dans les élevages, il devient impératif d'adopter des solutions technologiques avancées pour assurer la pérennité et la rentabilité du secteur avicole.

3. Objectifs du projet :

Dans le contexte des observations précédentes, le projet actuel a pour objectif la conception et la mise en œuvre d'un système intelligent de surveillance et de contrôle des paramètres environnementaux dans les exploitations avicoles. Ce système intégrera des technologies modernes et accessibles aux éleveurs algériens.

Voici les objectifs spécifiques :

- Dans le cadre de l'optimisation des conditions de fonctionnement des installations, il est essentiel d'automatiser la surveillance des paramètres essentiels à leur bonne gestion. Ces paramètres incluent notamment la température, l'humidité, l'éclairage et l'approvisionnement en eau. L'utilisation de capteurs appropriés pour la mesure de ces paramètres permet de garantir une gestion optimale et continue des installations.
- La mise en place d'un réseau sans fil, basé sur des modules NRF24L01, vise à faciliter la collecte et la transmission des données en temps réel, sans nécessiter l'utilisation de câblages complexes.
- L'intégration d'un module GSM dans le système permet l'acquisition d'alertes et la gestion à distance de l'infrastructure par le biais de messages de type SMS.
- Dans le cadre de notre étude, nous avons développé une application Android conviviale spécialement conçue pour les éleveurs. Cette application offre une interface intuitive permettant de surveiller les conditions de l'élevage, de visualiser l'historique des données

Introduction Générale

sous forme de graphiques et d'envoyer des commandes sans avoir à saisir manuellement des messages complexes.

- Dans le cadre de la mise en œuvre d'un système, il est impératif d'utiliser des microcontrôleurs ATmega328. Ces derniers permettent en effet d'assurer le traitement des données, la gestion des actionneurs (ventilateurs, pompes, éclairage) et la communication entre les différents modules du système.

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une démarche de modernisation de l'aviculture en Algérie. Cette initiative a pour objectif d'améliorer la productivité, de réduire les pertes et de faciliter le travail des éleveurs. Pour ce faire, elle prévoit l'intégration de solutions technologiques adaptées.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante :

Chapitre I : une présentation de l'état de l'art des systèmes de surveillance et de contrôle dans l'aviculture est proposée. Cette présentation comporte une analyse des technologies existantes et des besoins spécifiques du secteur en Algérie.



Chapitre II : nous aborderons en détail la conception du système proposé. Cela comprendra le choix des composants matériels et logiciels, ainsi que l'architecture générale du système.

Chapitre III : nous aborderons en détail le développement de l'application Android. Nous explorerons ensuite son intégration avec le système de surveillance, ainsi que les tests et la validation qui ont été effectués.

Introduction Générale

Bibliographie

- [1] El Watan. (2023, August 13). *Beaucoup ont gelé leur activité à cause des pics de chaleur et des risques d'incendies: Les aviculteurs dans le désarroi*. El Watan. <https://elwatan-dz.com/ beaucoup-ont-gele-leur-activite-a-cause-des-pics-de-chaleur-et-des-risques-dincendies-les-aviculteurs-dans-le-desarroi>.
- [2] El Watan. (2023, August 13). *Des aviculteurs gèlent leurs activités à cause des fortes chaleurs et des pertes subies: Les prix des viandes blanches et des œufs repartent à la hausse*. El Watan. <https://elwatan-dz.com/des-aviculteurs-gelent-leurs-activites-a-cause-des-fortes-chaleurs-et-des-pertes-subies-les-prix-des-viandes-blanches-et-des-oeufs-repartent-a-la-hausse> .
- [3] Algérie Focus. (2024, March 15). *Crise avicole en Algérie: Le poulet face à la flambée des prix du soja et du maïs*. Algérie Focus. <https://algeriefocus.com/crise-avicole-en-algerie-le-poulet-face-a-la-flambee-des-prix-du-soja-et-du-mais>,



Chapitre I : État de l'art

I.1. Introduction

L'aviculture joue un rôle crucial dans la garantie de la sécurité alimentaire, particulièrement dans des contextes socio-économiques sensibles comme celui de l'Algérie. Néanmoins, ce secteur est confronté à des défis majeurs liés aux conditions climatiques extrêmes, qui affectent directement la santé animale, la productivité et la viabilité économique des exploitations avicoles. Le contrôle précis du climat intérieur des bâtiments d'élevage devient ainsi une priorité absolue pour assurer des conditions optimales aux volailles, tout en améliorant l'efficacité énergétique et en réduisant les pertes économiques.

Ce chapitre présente un état de l'art approfondi des systèmes de contrôle climatique intelligents appliqués aux bâtiments avicoles. Il retrace tout d'abord les principales évolutions historiques de la filière avicole en Algérie, détaille ensuite les caractéristiques techniques essentielles des bâtiments d'élevage, et analyse enfin les technologies modernes utilisées aujourd'hui, notamment les systèmes basés sur GSM ainsi que les réseaux de capteurs sans fil (WSN).

I.2. Évolution et contexte de l'aviculture en Algérie

Depuis l'indépendance, l'évolution de l'aviculture en Algérie a traversé plusieurs phases distinctes :

1. Première phase (1962-1968)

- Après l'indépendance, le secteur avicole était quasiment inexistant, reposant essentiellement sur la transformation d'anciennes structures agricoles, notamment des porcheries, en bâtiments avicoles destinés principalement à l'engraissement des volailles.
- La consommation annuelle moyenne par habitant était extrêmement faible (environ 500 g de viande blanche et une dizaine d'œufs) [1].

2. Deuxième phase (1969-1989)

- Cette période est marquée par l'établissement de l'Office National des Aliments du Bétail (ONAB), dont l'objectif initial était de produire des aliments composés pour la volaille et de développer significativement le secteur avicole tout en régulant le marché des viandes.
- Des problèmes notables sont apparus en raison de la superposition des rôles et d'une certaine incohérence dans les processus de gestion, ce qui a conduit à une restructuration significative

à partir de 1980, dans le cadre de deux plans quadriennaux successifs (1980-1984 et 1985-1989).

- Durant cette restructuration, l'activité avicole a été régionalisée par la création de trois offices spécialisés (ORAC pour le centre, ORAVIE pour l'est, ORAVIO pour l'ouest), favorisant ainsi un développement notable de la production intensive [1].

3. Troisième phase (1990 à nos jours)

- Cette période est initialement caractérisée par une instabilité prononcée due à la « décennie noire » des années 90, qui a gravement affecté la production avicole nationale.
- Toutefois, à partir des années 2000, le secteur a connu une reprise significative. Par exemple, en 2006, la production a augmenté de près de 68 % par rapport à 2005, atteignant une production substantielle d'œufs (3,5 milliards d'unités).
- En 2011, la production est remontée à 300 000 tonnes de viande blanche et environ 5 milliards d'œufs.
- Une restructuration profonde a été opérée depuis 1997, se traduisant par l'émergence d'entreprises intégrées spécialisées dans les aliments pour bétail, la reproduction du matériel biologique, et l'abattage industriel.
- Malgré ces progrès, des défis majeurs persistent, tels que la faible productivité, les prix élevés et une production semi-industrielle limitant l'accessibilité des produits au grand public [2].

Période	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2014	2015	2016	2017
Production	198	150	170	241	306	475	463	460	515	529

Tableau 1.1 : Évolution quantitative de la production de viande blanche en Algérie [1][3].

I.3. Principes et caractéristiques des bâtiments avicoles

I.3.1. Définition et types de bâtiments avicoles

Un bâtiment avicole traditionnel est une structure simple permettant d'abriter les volailles tout en offrant une protection minimale contre les éléments extérieurs. En revanche, un bâtiment avicole intelligent intègre des technologies avancées pour surveiller et contrôler précisément l'environnement intérieur.

On distingue principalement deux types de bâtiments :

- **Bâtiments clairs** : Les bâtiments clairs sont caractérisés par la présence de fenêtres ou d'ouvertures permettant l'entrée de lumière naturelle. Ils utilisent principalement une ventilation statique basée sur les flux d'air naturels.



Figure I.1 : Exemple d'un bâtiment avicole clair avec ventilation naturelle [11].

- **Bâtiments obscurs** : Les bâtiments obscurs, au contraire, sont entièrement fermés et conçus pour offrir un contrôle total des conditions internes. L'éclairage et la ventilation y sont entièrement mécanisés, permettant un contrôle précis et automatisé des conditions climatiques à l'intérieur du bâtiment.



Figure I.2 : Exemple d'un bâtiment avicole obscur entièrement mécanisé [12].

I.3.2. Conception architecturale des bâtiments avicoles

La conception architecturale des bâtiments avicoles joue un rôle crucial pour assurer une production optimale. Celle-ci doit garantir à la fois la sécurité sanitaire, le confort des volailles et une gestion efficace des conditions climatiques internes.

I.3.2.1 Implantation des bâtiments

L'implantation des bâtiments avicoles doit respecter des normes précises visant à prévenir les risques sanitaires liés aux contaminations croisées entre différents bâtiments ou exploitations voisines. En général, une distance minimale de 30 mètres est recommandée entre deux bâtiments afin de limiter les risques sanitaires en cas d'apparition de maladies contagieuses. Une implantation adéquate doit également tenir compte de la direction des vents dominants, pour faciliter une ventilation naturelle efficace et réduire les risques d'humidité excessive à l'intérieur des bâtiments [4].

I.3.2.2 Dimensions et capacité des bâtiments

Les dimensions des bâtiments avicoles dépendent étroitement de l'effectif prévu pour l'élevage. Les largeurs standardisées sont généralement comprises entre 8 et 15 mètres. Les longueurs sont calculées en fonction de l'effectif animal attendu ; par exemple, un bâtiment typique destiné à accueillir environ 10 000 poulets peut mesurer environ 12 mètres de large sur 100 mètres de long. Le choix de ces dimensions doit être adapté afin de respecter une densité optimale, qui se situe généralement entre 10 et 15 poulets par mètre carré, permettant ainsi de garantir une bonne aération, un confort suffisant pour les volailles, et une facilité d'entretien [4].

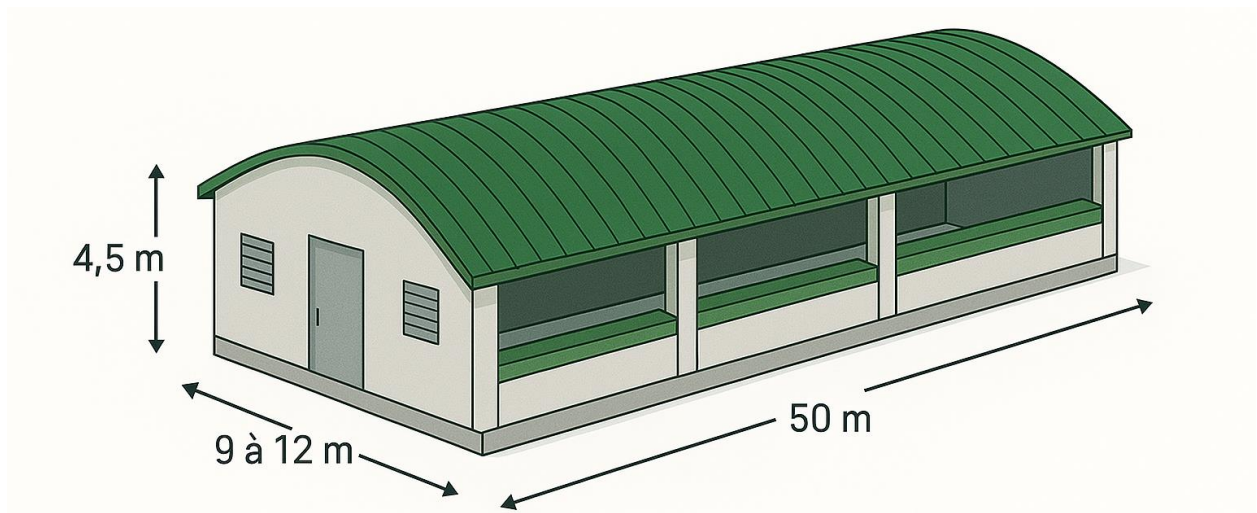


Figure I.3 : Schéma architectural typique d'un bâtiment avicole.

I.3.3. Équipements techniques d'un bâtiment avicole

Les bâtiments avicoles modernes sont équipés d'un ensemble d'infrastructures et de dispositifs visant à assurer le confort, la santé et la productivité des volailles. Voici les principaux équipements techniques utilisés dans un bâtiment d'élevage avicole intelligent [5] :

I.3.3.1. Abreuvoirs à cloche

Ces dispositifs assurent un approvisionnement continu en eau propre et fraîche, indispensable au bien-être et à la croissance des volailles.



Figure I.4 : Abreuvoir à cloche utilisé dans les bâtiments avicoles [13].

I.3.3.2. Citerne d'eau

La citerne est utilisée pour stocker l'eau destinée à l'alimentation des abreuvoirs ainsi qu'aux opérations d'hygiène du bâtiment (nettoyage, désinfection, etc.).



Figure I.5 : Citerne d'eau pour l'approvisionnement et l'hygiène [14].

1.3.3.3. Silo d'aliments

Le silo permet de stocker les aliments de manière sécurisée, en protégeant leur qualité nutritionnelle contre l'humidité et les nuisibles [15].



Figure I.6 : Silo d'aliments destiné au stockage sécurisé de la nourriture [15].

1.3.3.4. Ventilateurs

Ils assurent le renouvellement de l'air à l'intérieur du bâtiment, participant à la régulation de la température et à l'évacuation des gaz nocifs tels que l'ammoniac (NH_3) ou le dioxyde de carbone (CO_2).



Figure I.7 : Ventilateurs utilisés pour la ventilation mécanique [16].

1.3.3.5. Chauffages

Les systèmes de chauffage, notamment à rayonnement infrarouge, permettent de maintenir une température ambiante optimale, surtout pendant les périodes froides ou pour les jeunes poussins sensibles aux variations thermiques [17].



Figure I.8 : Systèmes de chauffage à rayonnement infrarouge [17].

1.3.3.6. Thermomètres

Disposés à différents points stratégiques du bâtiment, ils permettent de mesurer et surveiller en continu la température, afin de s'assurer qu'elle reste dans la plage recommandée pour le bien-être des volailles [18].



Figure I.9 : Thermomètre pour la surveillance thermique interne [18].

1.3.3.7. Lampes

Utilisées à la fois pour l'éclairage et comme source de chaleur d'appoint, notamment dans les zones destinées aux poussins [19].



Figure I.10 : Lampes d'éclairage et de chauffage pour les volailles [19].

1.3.3.8. Trappes et fenêtres d'aération

Ces dispositifs facilitent l'entrée d'air frais et permettent une distribution uniforme de la ventilation naturelle à travers le bâtiment, garantissant une bonne oxygénation sans courant d'air direct [20].



Figure I.11 : Trappes et fenêtres d'aération pour la circulation de l'air [20].

1.4. Paramètres environnementaux à contrôler

La gestion précise des paramètres environnementaux constitue un pilier fondamental dans la réussite d'un élevage avicole. Un déséquilibre de ces facteurs peut entraîner une baisse significative de la productivité, une augmentation du stress chez les animaux, et dans les cas extrêmes, une mortalité massive. Les paramètres à surveiller en priorité sont la température, l'humidité, la ventilation, la qualité de l'air, l'éclairage et le chauffage.

1.4.1. Température

La température est le paramètre le plus influent sur la croissance et la santé des volailles. Elle varie selon l'âge des animaux, et toute déviation importante peut nuire à leur développement. Une température trop élevée (>30 °C) peut induire un stress thermique, une diminution de la consommation alimentaire, voire une mortalité accrue. À l'inverse, des températures trop basses (<20 °C) poussent les volailles à consommer plus d'énergie pour se réchauffer, réduisant leur productivité [5].

Le tableau suivant illustre les températures idéales en fonction de l'âge des poussins :

Âge	Température Idéale
0 – 4 jours	35 – 32 °C
5 – 7 jours	32 – 30 °C
2ème semaine	30 °C
3ème semaine	28 °C
4ème semaine	26 °C
5ème semaine	21 °C
>5ème semaine	21 – 18 °C

Tableau 1.2 : Température idéale par âge [6].

1.4.2. Humidité

L'humidité relative est un autre facteur crucial à maîtriser. Un excès d'humidité favorise le développement de pathogènes et complique l'élimination de la chaleur corporelle par évaporation, particulièrement en période chaude. À l'inverse, une humidité trop faible assèche les muqueuses respiratoires et augmente la concentration de poussières dans l'air [6].

Les normes recommandées sont présentées ci-dessous :

Âge	Humidité idéale (%)
1 – 21 jours	55 – 60
22 – 28 jours	55 – 65
> 29 jours	60 – 70

Tableau 1.3 : Humidité optimale selon l'âge [6] .

1.4.3. Ventilation

La ventilation est essentielle pour assurer un bon renouvellement de l'air, apporter de l'oxygène frais et évacuer les gaz nocifs (CO₂, NH₃) ainsi que les excès d'humidité. On distingue deux types principaux :

- **Ventilation statique** : basée sur des trappes et fenêtres d'aération exploitant les différences naturelles de pression et de température.
- **Ventilation dynamique** : utilisant des ventilateurs ou extracteurs pour forcer la circulation de l'air.

Le tableau suivant indique les débits minimaux recommandés par sujet :

Âge	Ventilation (m ³ /h/sujet)
1 – 7	0,16
8 – 14	0,42
15 – 21	0,59
22 – 28	0,84
29 – 35	0,93
36 – 42	1,18
43 – 49	1,35
50 – 56	1,52

Tableau 1.4 : Taux de ventilation minimale [7].

1.4.5. Chauffage

En hiver, le chauffage est indispensable pour garantir une température ambiante stable, notamment pour les jeunes volailles. Les solutions incluent les chauffages à air pulsé, les planchers chauffants, ou encore les générateurs à gaz. Ces systèmes doivent être combinés avec une bonne isolation pour limiter les pertes de chaleur [7].

1.5. Technologies de contrôle climatique

Le contrôle des paramètres environnementaux dans les bâtiments avicoles a longtemps reposé sur des méthodes manuelles ou semi-automatisées. Cependant, avec l'évolution des besoins en matière de productivité, d'efficacité énergétique et de bien-être animal, des technologies modernes ont progressivement été intégrées aux systèmes d'élevage. On distingue ainsi deux grandes approches : la méthode classique et l'approche intelligente automatisée.

1.5.1. Approche classique

Les systèmes traditionnels s'appuient principalement sur des équipements de régulation de base, tels que des thermostats ou des hygrostats mécaniques, associés à des ventilateurs et à des dispositifs de chauffage ou d'éclairage commandés manuellement. Bien que simples à mettre en œuvre, ces dispositifs présentent plusieurs limites majeures :

- Ils offrent une précision relativement faible.
- Ils n'intègrent pas de système de surveillance en temps réel.
- Ils exigent une intervention humaine constante, ce qui multiplie les risques d'erreur ou de retard de réaction face à un changement climatique brusque.

Cette méthode est donc de moins en moins adaptée aux défis modernes du secteur avicole, notamment en matière de régulation fine des conditions intérieures et de réduction des pertes animales [8].

1.5.2. Approche moderne et automatisée

L'approche moderne du contrôle climatique dans les bâtiments avicoles repose sur l'automatisation et l'intelligence embarquée. Contrairement à la méthode classique fondée sur l'intervention humaine, elle s'appuie sur des technologies avancées permettant un suivi en temps réel des conditions environnementales et une réaction immédiate aux variations constatées. Au cœur de cette approche se trouvent des microcontrôleurs programmables, qui assurent la gestion des principaux paramètres de l'environnement intérieur : température, humidité, ventilation, qualité de l'air (CO₂, NH₃), éclairage, etc. Ces dispositifs, connectés à des capteurs placés à des points stratégiques du bâtiment, permettent une surveillance continue et précise.

Le système repose sur des algorithmes de régulation automatique qui comparent les mesures collectées aux seuils de confort définis pour les volailles, et déclenchent, si nécessaire, l'action des équipements adéquats (ventilation, chauffage, brumisation, etc.). Ce mécanisme de rétroaction (feedback) garantit une adaptation dynamique de l'environnement, même en cas de variations rapides du climat extérieur.

Par ailleurs, ces systèmes peuvent intégrer des interfaces de télésurveillance, accessibles via une application mobile ou une interface web, permettant à l'éleveur de consulter les données à distance, de recevoir des alertes en cas d'anomalie et de modifier les paramètres de fonctionnement selon les besoins. Certaines installations incluent également des fonctions d'enregistrement et d'analyse de données historiques, utiles à améliorer la gestion et à optimiser les performances de l'élevage. Ainsi, cette approche moderne, fondée sur des technologies embarquées et accessibles, offre une solution efficace, autonome et évolutive, parfaitement adaptée aux exploitations avicoles modernes, même de petite ou moyenne taille [9].

1.6. Réseaux de capteurs sans fil appliqués à l'aviculture

L'intégration des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks – WSN) dans le domaine avicole constitue une avancée majeure vers l'automatisation intelligente des exploitations. Ces réseaux permettent une collecte décentralisée, continue et en temps réel des données environnementales, tout en assurant une communication efficace entre les unités de surveillance et de contrôle réparties dans le bâtiment.

1.6.1. Définition et principes de base

Un réseau de capteurs sans fil est constitué d'un ensemble de nœuds intelligents (ou « nodes »), généralement équipés de capteurs, d'un microcontrôleur, d'un module de communication et d'une source d'énergie. Chaque nœud capte des données physiques (température, humidité, gaz, luminosité, etc.) et les transmet à un nœud central ou à une passerelle, souvent via un protocole radio de faible puissance comme le NRF24L01, bien adapté aux environnements agricoles pour sa faible consommation et sa portée correcte (jusqu'à 200 m en champ libre) [10].

1.6.2. Architecture typique

Dans une exploitation avicole, l'architecture d'un WSN repose souvent sur une topologie en étoile ou en maillage, avec plusieurs unités de mesure réparties dans les différentes zones du bâtiment (zones chaudes, zones proches des entrées d'air, zones d'alimentation, etc.). Chaque capteur envoie ses données à une unité centrale de collecte reliée à un microcontrôleur principal. Cette unité peut ensuite transmettre les données à une interface de contrôle locale (écran, terminal série) ou à une plateforme en ligne via une passerelle GSM ou Wi-Fi.

1.6.3. Types de capteurs utilisés

Dans le cadre d'une solution accessible et efficace pour l'élevage avicole, les capteurs les plus fréquemment utilisés sont ceux permettant de mesurer :

- **La température** ambiante, souvent mesurée à l'aide de capteurs numériques comme le DS18B20, qui offrent une précision suffisante pour suivre les variations thermiques dans l'environnement des volailles.
- **L'humidité relative**, mesurée à l'aide de capteurs comme le **DHT11** ou le **DHT22**, permet de maintenir une hygrométrie adaptée à chaque phase de croissance.

Ces capteurs répondent aux besoins essentiels de surveillance dans un bâtiment avicole. Bien que certains systèmes industriels puissent intégrer des capteurs de gaz ou de lumière, leur recours n'est pas indispensable pour des solutions à base de microcontrôleurs et reste souvent réservé aux installations de grande échelle.

1.6.4. Avantages pour l'élevage avicole

L'intégration de réseaux de capteurs sans fil dans un bâtiment avicole présente de nombreux atouts :

- **Installation simplifiée**, sans besoin de câblage complexe ;
- **Souplesse dans le positionnement des capteurs**, pouvant être adaptés à la configuration du bâtiment ;
- **Suivi en temps réel**, avec la possibilité d'envoyer des alertes automatiques en cas de dépassement des seuils ;

- **Automatisation des réponses** (activation de ventilation, chauffage, etc.) sans intervention humaine constante ;
- **Compatibilité avec des plateformes cloud** pour l'enregistrement, l'affichage graphique et l'analyse à long terme des données.

Cette approche offre ainsi un compromis optimal entre efficacité, coût réduit, autonomie, et adaptabilité à différents environnements d'élevage.


I.7. Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir un état des lieux précis des enjeux climatiques dans les bâtiments avicoles, en soulignant l'importance d'une régulation environnementale efficace pour garantir la santé, le bien-être et la productivité des volailles. L'analyse du contexte avicole en Algérie a mis en évidence la vulnérabilité des exploitations face aux conditions climatiques extrêmes et l'insuffisance des méthodes de gestion traditionnelles. Dans ce cadre, les avancées technologiques offrent des perspectives prometteuses grâce à l'automatisation et à l'intégration de capteurs connectés. Les systèmes de contrôle modernes, reposant sur des microcontrôleurs, des réseaux de capteurs sans fil et des interfaces de supervision à distance, permettent une gestion précise, réactive et économe des conditions intérieures des bâtiments. Ces éléments constituent le fondement même du système proposé dans ce travail. Le chapitre suivant sera consacré à la conception du système intelligent, en détaillant l'architecture matérielle et logicielle, ainsi que les choix technologiques retenus et leur justification technique.


Bibliographie Chapitre I

- [1] Kaci, A., & Boukella, M. (2007). La filière avicole en Algérie: structures, compétitivité, perspectives. *Les cahiers du CREAD*, 23(81), 129-153.
- [2] Kaci, A. (2015). La filière avicole algérienne à l'ère de la libéralisation économique. *Cahiers Agricultures*, 24(3), 151-160.
- [3] A. Nadir, “ Situation actuelle et perspectives de modernisation de la filière avicole en Algérie,” *J. la Rech. Avic. algérienne*, 2011.
- [4] Merah, F. Z., & Chertouk, H. (2019). *L'architecture avicole en milieux extrêmes : Projet de bâtiment d'élevage avicole (poulet de chair) à Timimoun (Algérie)* [Mémoire de master, Université Saad Dahleb – Blida 1]. Université de Blida 1.
- [5] Vencomatic Group. (2023, 30 juin). *L'importance du contrôle de la température pour les éleveurs de volailles pondeuses*. <https://www.vencomaticgroup.com/fr/blog/temperature-control-for-layer-poultry-farmers> .
- [6] Haoua, Z., & Mohamed Mahmoud, O. (2019). *Vers des bâtiments intelligents pour l'élevage de volaille* [Mémoire de master, Faculté des Sciences, Département d'Informatique]. Université (précisez le nom si connu).
- [7] Aviagen. (2018). *Guide d'élevage du poulet de chair Arbor Acres* (Éd. française). <https://appec-h.com/wp-content/uploads/2024/07/AA-BroilerHandbook2018-FR.pdf>
- [8] Soumia, R., Mokhbi, Y., Rebha, G., Bakhta, R., & Noureddine, S. (2024). Solar-powered modern poultry farm: a case study BAYAT complex Ouargla, Algeria. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), e9408-e9408.
- [9] SKOV. (n.d.). *Climate control for poultry*. Retrieved May 10, 2025, from <https://www.skov.com/en/climate/poultry/>.
- [10] Raju, K. L., & Vijayaraghavan, V. (2021). 3 Internet of Agriculture Things (IoAT). *Green Engineering and Technology: Innovations, Design, and Architectural Implementation*, 35.

- [11] <https://fr.cn-poultryshed.com/Content/upload/2018231094/201807121059454940144.jpg>
- [12] <https://pbs.twimg.com/media/ChyyynGXEAAnOTL.jpg>.
- [13] <https://agrotimes.ua/wp-content/uploads/2025/04/02-krapleulovlyuvach.jpg>.
- [14] <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcThHB4vBma1HczVkZw6FSNGILHuzEKaSTAGc0DfCx6v03H5Q8MV>.
- [15] <https://www.bergue-silos.fr/wp-content/uploads/2020/02/silo-deplacable.jpg> .
- [16] <https://preview.free3d.com/img/2022/07/3190238814106814410/uxdapm4n.jpg>.
- [17] https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQqOIWOfdb_xy_jSAGO5VtTbLpD5mUB5Nz7u2Q6vySfHokhs29r.
- [18] <https://image.made-in-china.com/365f3j00WPoqenIlCHuD/Thermom-tres-num-riques-de-temp-rature-et-d-humidit-en-plastique-r-sistant-la-chaleur-pour-la-maison.webp>.
- [19] https://img.agriexpo.online/pt/images_ag/photo-m2/171705-10892573.webp.
- [20] https://img.agriexpo.online/fr/images_ag/photo-m2/171220-13358257.jpg.



***Chapitre II : Conception du système
intelligent de contrôle climatique***



II .1. Introduction

Ce chapitre présente la conception du système intelligent de contrôle climatique développé dans le cadre de ce projet. L'objectif principal est de permettre une surveillance automatique des conditions environnementales dans un bâtiment avicole à l'aide de capteurs, d'un microcontrôleur, et d'un système de communication sans fil. Le système vise à améliorer la fiabilité, l'autonomie et la réactivité de la gestion du climat intérieur. Les choix techniques sont orientés vers des solutions simples, accessibles et adaptées aux contraintes des exploitations avicoles locales. La suite du chapitre décrit l'architecture du système, les composants matériels et les justifications associées.

II .2. Architecture générale du système

Le système intelligent conçu pour le contrôle climatique des bâtiments avicoles repose sur une architecture modulaire, répartie entre plusieurs unités fonctionnelles interconnectées. Chaque unité joue un rôle spécifique dans la collecte des données, le traitement des informations, la communication et l'exécution des actions correctives.

L'architecture se compose des éléments suivants :

- **Unité de mesure** : composée de capteurs numériques permettant de mesurer les températures et les humidités à l'intérieur du bâtiment.
- **Unité de traitement** : assurée par un, qui analyse les mesures reçues et décide des actions à entreprendre.
- **Unité de communication** :
 - **Locale**, basée sur le module sans fil NRF pour la transmission des données entre les différents nœuds du système.
 - **À distance**, assurée par un module GSM, permettant d'envoyer des alertes par SMS et de recevoir des commandes de l'utilisateur.
- **Unité d'action** : composée de relais ou de modules de puissance permettant d'activer des dispositifs tels que ventilateurs, chauffages ou éclairage.
- **Interface utilisateur** :

- **Surveillance à distance** via une application Android ou des SMS.

L'ensemble de ces éléments fonctionne en coordination pour garantir une gestion automatisée du climat intérieur. L'interconnexion des modules se fait selon une architecture en étoile ou en réseau maillé, selon le nombre de points de mesure, avec un microcontrôleur central qui agit comme coordinateur.

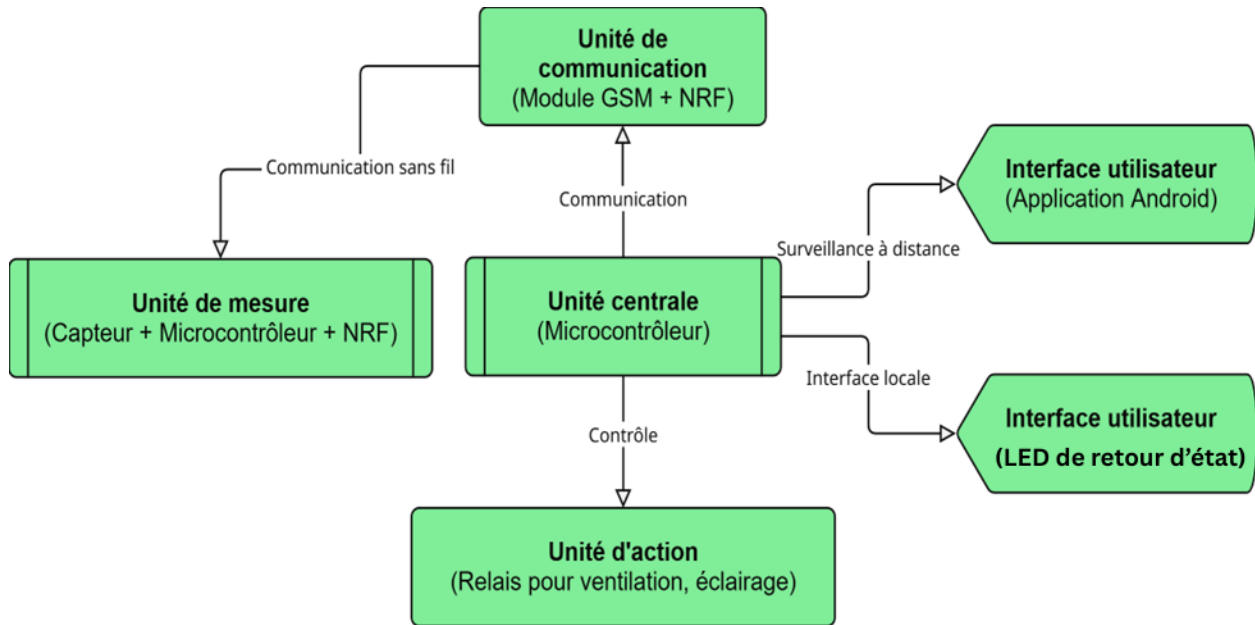


Figure 2.1 : Architecture générale du système intelligent de contrôle climatique

II .3. Partie matérielle

II .3.1. Présentation d'Arduino

II.3.1.1. Définition

L'**Arduino Uno** est une carte de développement électronique basée sur le microcontrôleur **ATmega328P**. Elle est conçue pour faciliter la création de projets électroniques interactifs et constitue une plateforme idéale pour les débutants comme pour les professionnels. La carte intègre tout le nécessaire pour lancer le microcontrôleur : une interface USB pour la programmation, une

alimentation, des broches d'entrée/sortie numériques et analogiques, ainsi qu'un oscillateur à 16 MHz. Elle peut être alimentée via une connexion USB ou une source d'alimentation externe [1].

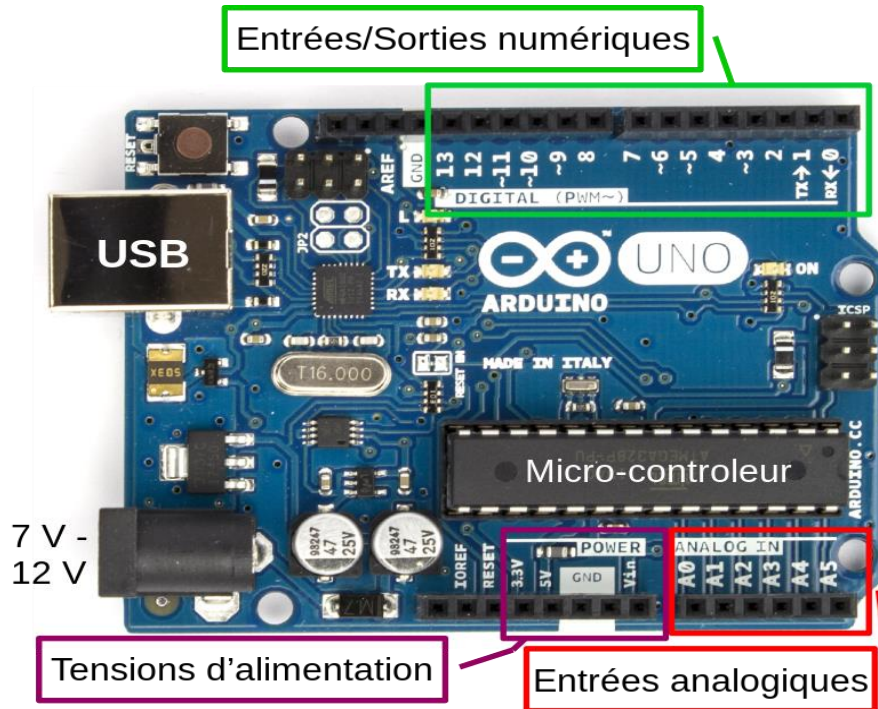


Figure 2.2 : Carte Arduino Uno Rev3[12].

II.3.2.3. Utilisation de l'ATmega328P avec l'Arduino

Sur la carte Arduino Uno, l'ATmega328P est préprogrammé avec un bootloader qui permet de télécharger du code via l'interface USB sans avoir besoin d'un programmeur externe. Cette intégration facilite le développement et le prototypage rapide. De plus, l'ATmega328P gère les entrées/sorties, les communications série et le traitement des données provenant des capteurs, ce qui en fait le cœur du système Arduino [2].

Le choix de l'ATmega328P pour notre projet repose sur plusieurs facteurs :

- **Compatibilité** : Il est nativement intégré à la carte Arduino Uno, assurant une parfaite compatibilité matérielle et logicielle.
- **Communauté et support** : Une vaste communauté d'utilisateurs et de développeurs offre un support technique abondant, ainsi que des bibliothèques et des exemples de code.

- **Performance** : Avec une fréquence de 16 MHz et une architecture RISC, il offre des performances suffisantes pour gérer les capteurs et les actionneurs de notre système.
- **Consommation énergétique** : Ses modes d'économie d'énergie permettent une utilisation efficace dans des applications nécessitant une autonomie prolongée.
- **Coût** : Son prix abordable en fait une solution économique pour des projets à grande échelle.

En résumé, l'ATmega328P répond parfaitement aux exigences de notre système de contrôle climatique, alliant performance, fiabilité et facilité d'intégration.

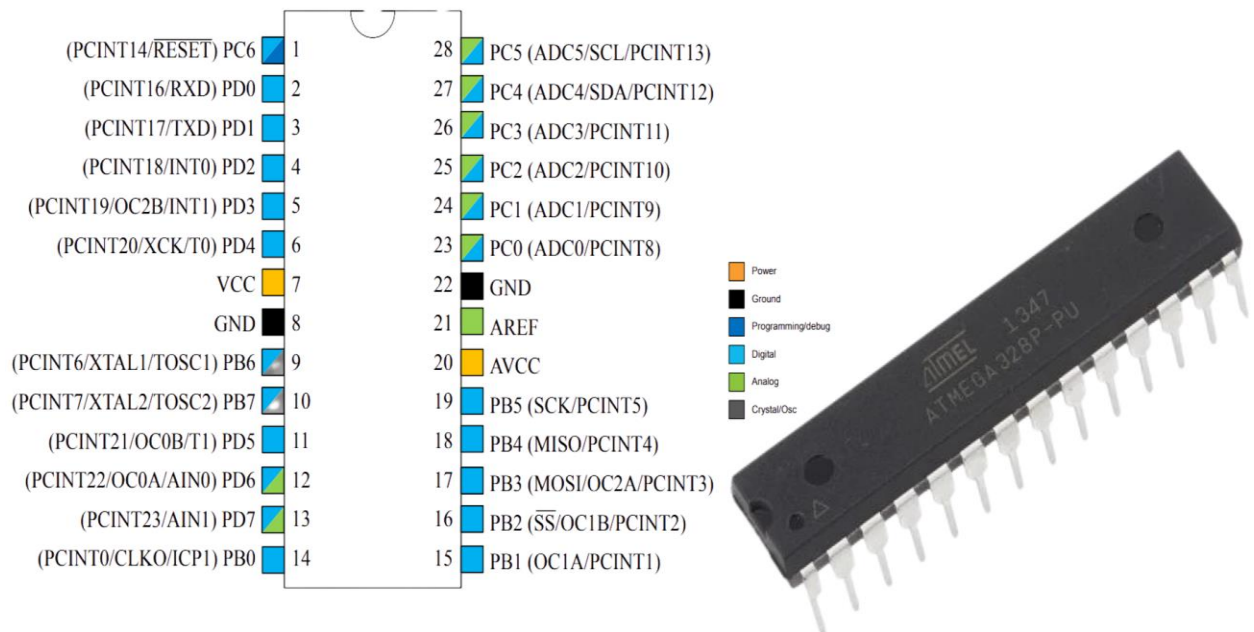


Figure 2.3 : Microcontrôleur ATmega328P – Brochage [13].

II.3.3. Modules et composants d'entrée-sortie

II.3.3.1. Capteur de température et d'humidité DHT22

Le **DHT22** est un capteur numérique qui mesure la température et l'humidité ambiantes. Il utilise un capteur capacitif pour l'humidité et une thermistance pour la température, fournissant des lectures précises via une interface numérique à un seul fil [3].

- Plage de mesure : Température de -40 °C à +80 °C ; Humidité de 0% à 100% RH

- Précision : $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pour la température ; $\pm 2\%$ RH pour l'humidité
- Tension d'alimentation : 3,3V à 6V DC
- Interface : Signal numérique via un seul fil [4].

Ce capteur est idéal pour les applications nécessitant une surveillance environnementale fiable.

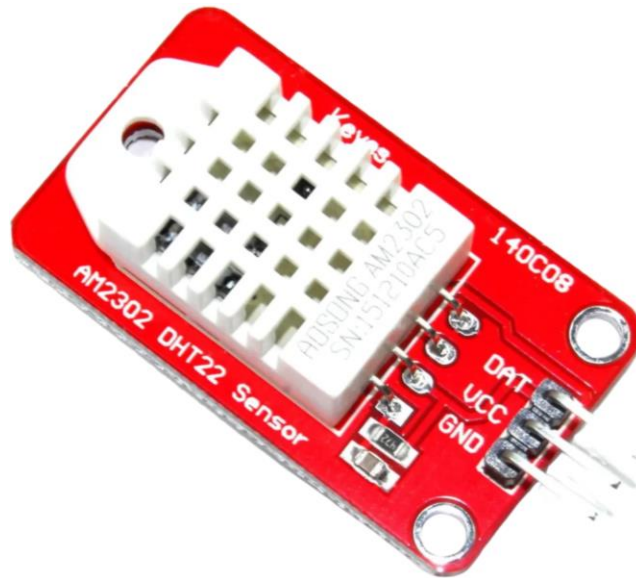


Figure 2.4 : Capteur de température et d'humidité DHT22 [14].

II.3.3.2. Capteur de température DS18B20

Le DS18B20 est un capteur de température numérique à interface 1-Wire, qui permet la communication sur une seule ligne de données. Il offre une résolution programmable de 9 à 12 bits et peut être alimenté en mode parasite, ce qui élimine le besoin d'une alimentation externe [5].

- Plage de mesure : -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$
- Précision : $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dans la plage de -10°C à $+85^{\circ}\text{C}$
- Interface: 1-Wire
- Alimentation: 3,0V à 5,5V

Sa conception étanche le rend adapté aux environnements humides ou aux applications nécessitant une immersion [5].



Figure 2.5 : Capteur de température DS18B20 – Sonde étanche [15].

II.3.3.3. Module de communication sans fil nRF24L01

Le **nRF24L01** est un module émetteur-récepteur RF fonctionnant dans la bande ISM 2,4 GHz. Il permet une communication bidirectionnelle sans fil entre microcontrôleurs, avec une faible consommation d'énergie [6].

- **Fréquence** : 2,4 GHz (bande ISM)
- **Débit de données** : Jusqu'à 2 Mbps
- **Tension d'alimentation**: 1,9V à 3,6V
- **Interface**: SPI
- **Consommation** : 11,3 mA en transmission à 0 dBm ; 12,3 mA en réception à 2 Mbps

Ce module est couramment utilisé pour les communications sans fil entre dispositifs Arduino [6].

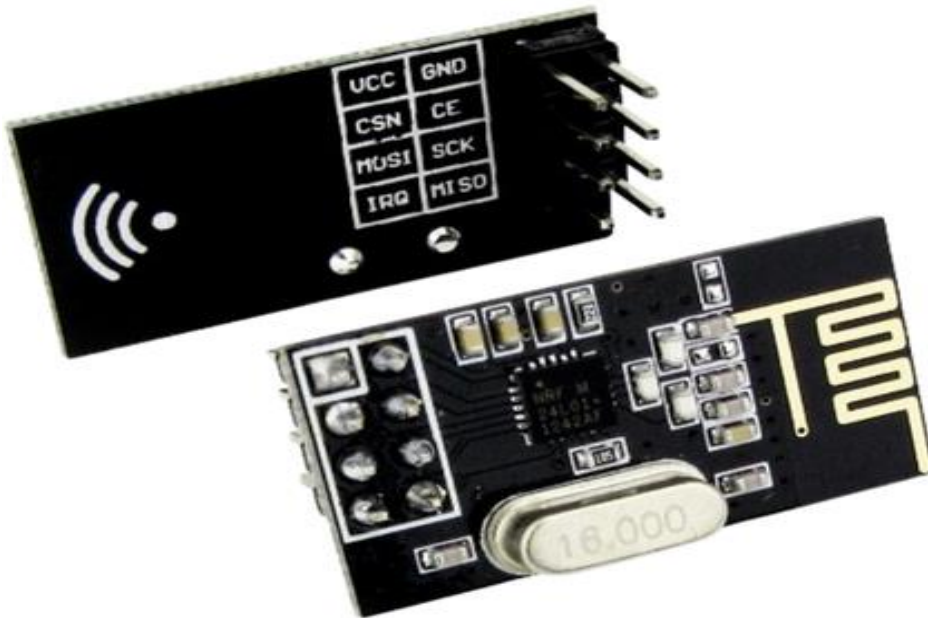


Figure 2.6 : Module nRF24L01 – Émetteur-récepteur RF 2,4 GHz [17].

II.3.3.4. Module GSM A7670C

Le **A7670C** est un module de communication 4G LTE/GSM/GPRS conçu par SIMCom pour offrir une connectivité mobile complète incluant la transmission de données, les SMS et les appels vocaux. Il communique avec les microcontrôleurs via une interface UART (niveau TTL) et prend en charge un ensemble complet de commandes AT conformes aux spécifications 3GPP TS 27.007 et 27.005.

- **Tension d'alimentation** : 3,2 V à 4,8 V DC
- **Interface** : UART (TTL)
- **Fonctionnalités** : 4G LTE Cat-1, appels vocaux, SMS, TCP/IP, HTTP, MQTT, commandes AT. Grâce à sa faible consommation d'énergie et à sa compatibilité étendue, le A7670C est largement utilisé dans les applications embarquées nécessitant une communication à distance fiable et économique, telles que la télégestion, la domotique et les systèmes de surveillance environnementale [7].



Figure 2.7 : Module GSM A7670C [17].

II.4. Partie logicielle

II.4.1. Environnement de développement Arduino IDE

L'Arduino IDE (**I**ntegrated **D**evelopment **E**nvironment) est l'environnement de développement officiel utilisé pour programmer les cartes Arduino. Il permet d'écrire, compiler et transférer du code directement sur le microcontrôleur de la carte via une interface USB. L'IDE est compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation (Windows, Linux, macOS) et utilise un langage de programmation basé sur le C/C++. L'interface de l'IDE est simple et épurée, conçue pour rendre la programmation accessible aux débutants tout en offrant une grande flexibilité aux utilisateurs avancés. Elle comprend un éditeur de code, un moniteur série, un compilateur intégré et un système de gestion des bibliothèques [8].

II.4.2. Environnement de développement Android Studio

L'application mobile développée pour ce projet a été conçue à l'aide d'**Android Studio**, l'environnement de développement officiel pour les applications Android. Android Studio repose sur **IntelliJ IDEA** de JetBrains, et propose des outils puissants pour la conception, la programmation, le test et le déploiement d'applications mobiles. Le langage de programmation utilisé est **Kotlin**, recommandé par Google depuis 2019 comme alternative moderne au Java.

Kotlin se distingue par sa concision, sa sécurité (notamment dans la gestion des nullités) et sa parfaite intégration avec les bibliothèques Android existantes [9].

L'environnement permet de :

- Concevoir des interfaces graphiques à l'aide de l'éditeur visuel ou de l'XML.
- Tester l'application à l'aide de l'émulateur Android intégré.
- Suivre et déboguer le code en temps réel.
- Gérer les permissions et la communication par SMS.

Dans le cadre de ce système de contrôle climatique, Android Studio a permis de concevoir une application simple, intuitive et adaptée aux besoins des élèves, avec une interface graphique légère et une communication directe avec le module GSM à travers des commandes SMS.

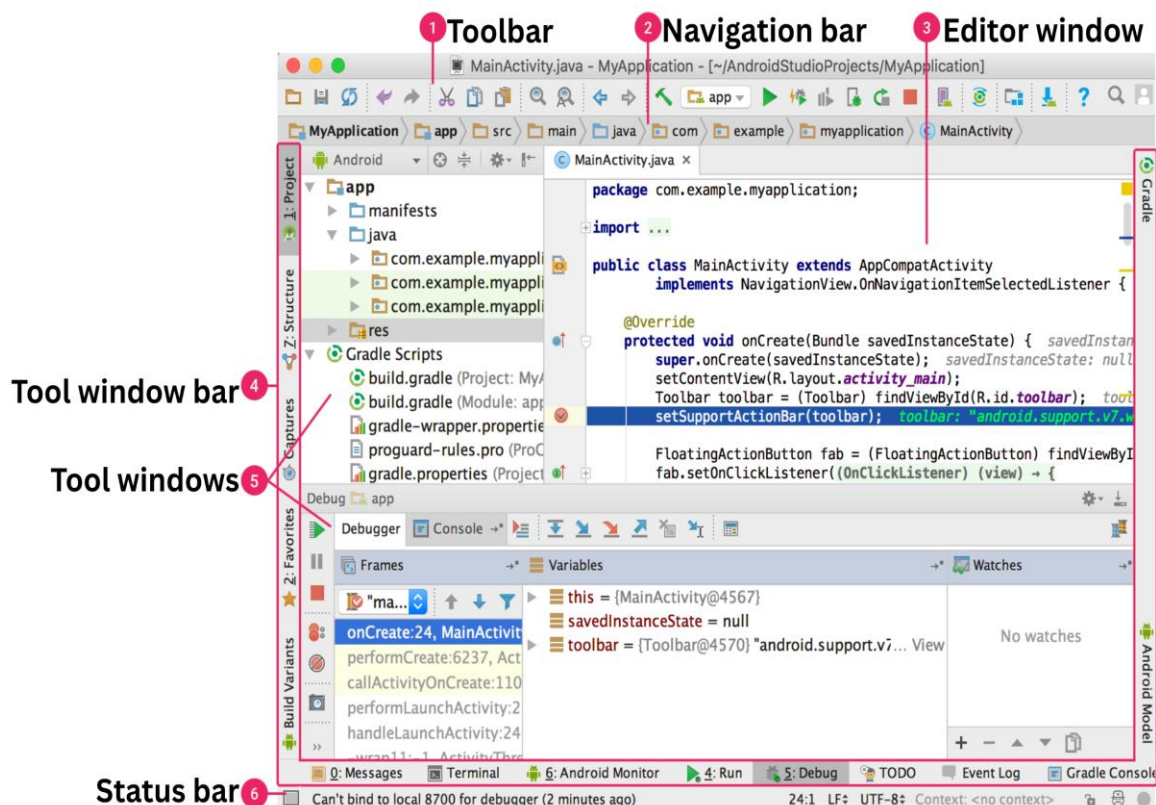


Figure 2.8: Interface de l'environnement Android Studio.

II.5. Technologies de communication utilisées

Dans un système intelligent de contrôle climatique, la communication joue un rôle central. Elle permet de transmettre les données issues des capteurs vers une unité de traitement, puis de relayer les décisions aux actionneurs, tout en assurant une supervision locale ou à distance. Deux types de communications sont généralement mises en œuvre :

- **La communication locale**, utilisée à l'intérieur du bâtiment avicole, permet aux différents nœuds (capteurs, actionneurs, unité centrale) d'échanger les données via des modules sans fil de courte portée, comme le **NRF24L01**.
- **La communication distante**, quant à elle, permet à l'éleveur de suivre et de contrôler son exploitation à distance, en utilisant des technologies mobiles comme le **GSM**, via le module **A7670C**.

Ces deux technologies sont complémentaires : l'une optimise la gestion interne du système, tandis que l'autre permet une interaction avec l'utilisateur, où qu'il se trouve

II.5.1. Communication locale par radiofréquence (RF)

La communication locale sans fil dans notre système repose sur l'utilisation du module **nRF24L01**, qui exploite la technologie de **radiofréquence (RF)** dans la **bande ISM de 2,4 GHz**, libre d'utilisation à l'échelle mondiale. Cette technologie permet une communication fiable, bidirectionnelle et économique entre microcontrôleurs, sans infrastructure réseau complexe [10].

❖ Principe de fonctionnement

Le module utilise une **modulation GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)** pour transmettre des données numériques sur des **canaux radio espacés de 1 MHz**, offrant **jusqu'à 125 canaux disponibles** (figure 2.11). Cette séparation fréquentielle permet d'éviter les interférences et d'exploiter plusieurs connexions en parallèle.

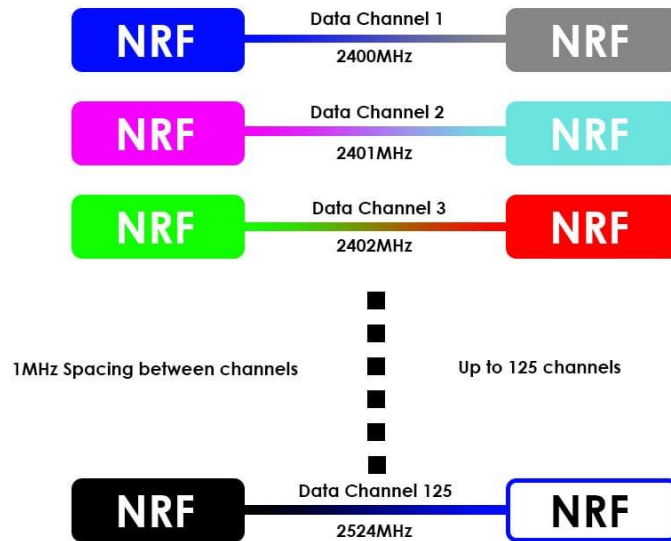


Figure 2.9 : Répartition des canaux de communication RF utilisés par le nRF24L01 [18].

En pratique, un nRF24L01 peut être configuré en mode **récepteur central**, capable de recevoir des données simultanément de **six émetteurs distincts** via des canaux logiques appelés **Data Pipes**. Chaque canal est identifié par une adresse unique, ce qui permet une organisation en **topologie en étoile**, bien adaptée aux réseaux de capteurs distribués dans un bâtiment d'élevage (figure 2.11).

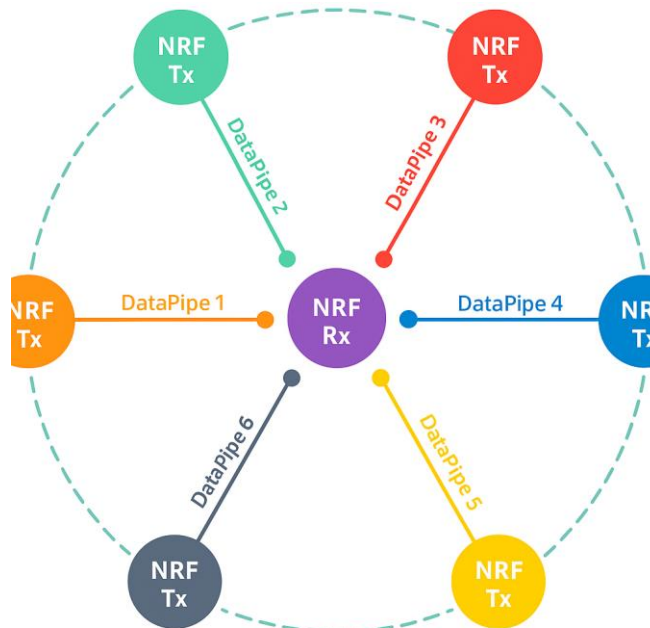


Figure 2.10 : Exemple de topologie en étoile pour un réseau de capteurs nRF24L01 [20].

❖ Transmission fiable et gestion automatique

Le protocole embarqué **Enhanced ShockBurst** assure un contrôle automatique des paquets : ajout d'en-têtes, vérification du CRC, accusés de réception (ACK) et retransmission automatique en cas d'erreur. Cela allège la charge du microcontrôleur hôte et garantit une **transmission fiable**, essentielle dans des environnements perturbés (voir la figure 2.12).

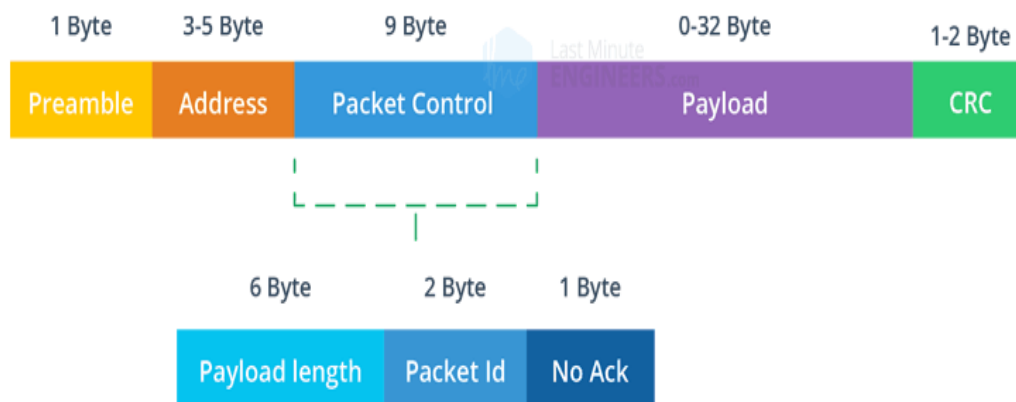


Figure 2.11 : Fonctionnement du protocole Enhanced ShockBurst [19].

❖ Intérêt pour le contrôle climatique

Cette technologie est parfaitement adaptée à un système de surveillance environnementale avicole pour plusieurs raisons :

- **Faible consommation énergétique**, idéale pour des unités sur batterie ;
- **Portée raisonnable** (jusqu'à 100–200 m en champ libre) ;
- **Temps de latence réduit**, permettant une **réaction quasi-instantanée** à toute variation de température ou d'humidité ;

Coût très faible, permettant l'équipement de plusieurs zones du bâtiment sans surcoût significatif.

II.5.2. Communication à distance via GSM

La technologie **GSM** (*Global System for Mobile Communications*) est une norme de communication mobile numérique développée pour offrir une connectivité universelle via les réseaux cellulaires. Elle est utilisée depuis les années 1990 comme infrastructure principale pour les appels vocaux et l'envoi de messages courts (*SMS*), en particulier dans les zones rurales ou mal desservies par Internet. Dans le cadre de ce projet, le GSM permet une **télégestion fiable et indépendante de l'Internet**, en s'appuyant sur le réseau cellulaire pour assurer la communication entre le système embarqué (via le module A7670C) et l'utilisateur final. Ce type de communication est particulièrement adapté aux environnements agricoles ou avicoles où l'accès au Wi-Fi est limité.

❖ Fonctionnement de la technologie GSM

Le GSM repose sur une **division temporelle des canaux de fréquence** (*Time Division Multiple Access – TDMA*) : chaque fréquence radio est subdivisée en plusieurs intervalles de temps, ce qui permet à plusieurs utilisateurs de partager le même canal. Typiquement, un canal de 200 kHz est divisé en huit créneaux, permettant jusqu'à huit communications simultanées sur la même fréquence. Le système GSM comprend plusieurs sous-systèmes qui coopèrent pour permettre la transmission de données :

- **MS (Mobile Station)** : l'appareil de l'utilisateur, équipé d'une carte SIM, d'un transcepteur radio et d'un processeur numérique.
- **BSS (Base Station Subsystem)** : il assure la communication radio entre l'appareil et le réseau. Il comprend :
 - La **station de base (BTS)** : gère la transmission RF.
 - Le **contrôleur de station de base (BSC)** : supervise les BTS.
- **NSS (Network Switching Subsystem)** : le cœur du réseau mobile, qui gère le routage des appels, l'identification des utilisateurs via des bases de données (HLR/VLR), et la commutation des appels à travers les opérateurs.

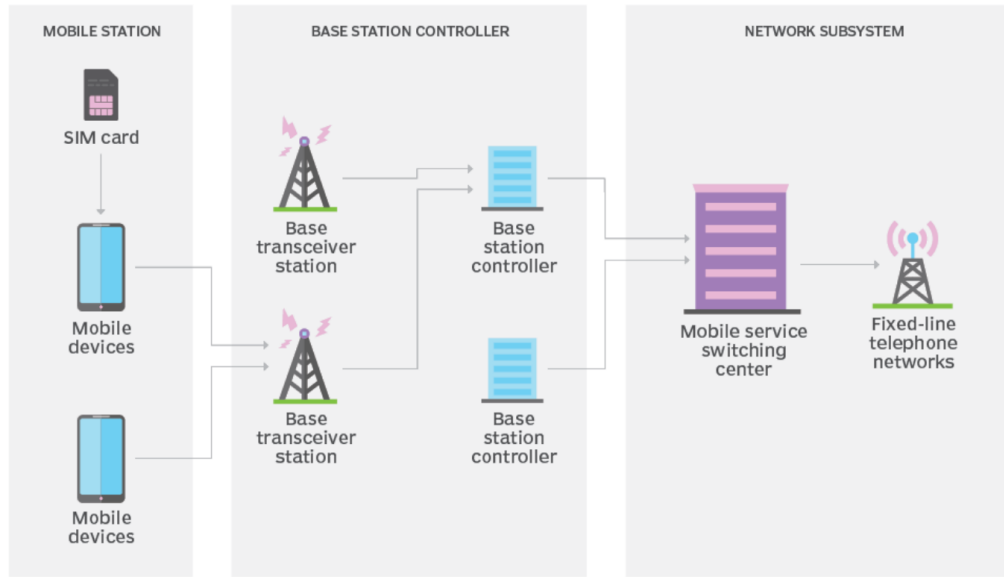


Figure 2.12 : Schéma fonctionnel simplifié du réseau GSM, incluant MS, BTS, BSC, et NSS [21].

Ce découpage permet une **communication mobile fluide, même en déplacement**, sans perte de service. Le module A7670C utilise ce principe pour envoyer des **SMS d'alerte** ou recevoir des **commandes à distance** depuis un téléphone de l'éleveur, en toute autonomie.

Avantages du GSM dans un système embarqué

- **Indépendance du réseau local** : fonctionne sans Wi-Fi ou Internet.
- **Portabilité universelle** : compatible avec la majorité des réseaux mondiaux, il est basé sur une carte SIM.
- **Simplicité d'implémentation** : l'envoi et la réception de messages se font via de simples commandes AT.
- **Faible consommation énergétique** : idéal pour les systèmes embarqués autonomes.

En résumé, la technologie GSM constitue une solution robuste pour la supervision à distance dans des environnements isolés, en garantissant une accessibilité constante et une communication fiable depuis toute zone couverte par un opérateur cellulaire.

II.6. Conclusion

La conception du système intelligent de contrôle climatique décrite dans ce chapitre repose sur une architecture matérielle et logicielle cohérente, spécialement adaptée aux exigences de l'élevage avicole. Elle intègre des microcontrôleurs, des capteurs environnementaux et des modules de communication sans fil afin de créer une solution autonome, modulaire et évolutive. Le choix de la carte Arduino Uno et du microcontrôleur ATmega328P s'explique par leur simplicité, leur faible coût et la richesse de leur environnement de développement. Les capteurs DHT22 et DS18B20 assurent une mesure précise et fiable des paramètres climatiques, tandis que la communication est assurée localement par le module nRF24L01 (RF) et à distance par le module A7670C (GSM), garantissant une connectivité complète. Les environnements Arduino IDE et Android Studio ont permis de développer une interface conviviale et une application mobile efficace pour superviser le système. En résumé, ce chapitre établit les bases techniques du système de contrôle climatique intelligent, tandis que le chapitre suivant portera sur sa mise en œuvre pratique, les schémas électroniques et les tests de validation en conditions réelles.

Bibliographie Chapitre II :

- [1] Arduino.(n.d.) *Uno Rev3*. Arduino Documentation.
<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- [2] Microchip Technology Inc. (2017). *ATmega328PB datasheet*.
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001906A.pdf>
- [3] CityOS. (n.d.). *DHT22 - Digital Temperature and Humidity Sensor*. CityOS Air Documentation. <https://cityos-air.readme.io/docs/4-dht22-digital-temperature-humidity-sensor>
- [4] Waveshare. (n.d.). *DHT22 Temperature-Humidity Sensor*. Waveshare Wiki.
https://www.waveshare.com/wiki/DHT22_Temperature-Humidity_Sensor
- [5] Maxim Integrated. (2008). *DS18B20: 1-Wire digital thermometer* [Data sheet].
<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>,
- [6] Nordic Semiconductor ASA. (2007). *nRF24L01: Single chip 2.4GHz transceiver product specification*(Rev.2.0) [Datasheet].
https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Nordic/nRF24L01_Product_Specification_v2_0.pdf
- [7] MakerHero. (n.d.). *A7670C GSM/GPRS module datasheet*. Retrieved May 21, 2025, from https://nostris.ee/pdf/A7670%20Series%20Hardware%20Design_V1.00.pdf.
- [8] Arduino. (n.d.). *Environment*. Arduino. Retrieved June 3, 2025, from <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/Environment/>
- [9] Android Developers. (n.d.). *Meet Android Studio*. Retrieved June 3, 2025, from <https://developer.android.com/studio/intro>
- [10] Last Minute Engineers. (n.d.). *How nRF24L01 wireless module works & interface with Arduino*. Last Minute Engineers. Retrieved June 3, 2025, from <https://lastminuteengineers.com/nrf24l01-arduino-wireless-communication/>.

- [11] Awati, R., Ndungu, S., & Mixon, E. (2025, May 27). *What is GSM (Global System for Mobile Communications)* TechTarget.
<https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/GSM>
- [12] https://putaindecode.io/public/images/articles/2018-05-07-programmation-arduino-presentation-pour-les-debutants/Arduino_Uno.jpg.
- [13] https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQlXYORxAz0mVa9bulilAAiBhPIBIT87dey1lgk_QOCrD8SRGeX
- [14] https://powerlab.dz/wp-content/uploads/2023/02/6fc76dc9-f15a-4af4-904c-f634cbc0bf88_1024x1024@2x.webp.
- [15] <https://mhtronic.com/wp-content/uploads/2022/02/ds18b20-2.jpg>
- [16] [https://i.ebayimg.com/00/s/OTc3WDEwMDE=/z/SMAAAOSw7CBj7x4L/\\$_12.JPG?set_id=880000500F](https://i.ebayimg.com/00/s/OTc3WDEwMDE=/z/SMAAAOSw7CBj7x4L/$_12.JPG?set_id=880000500F).
- [17] https://m.media-amazon.com/images/I/61R4h1XUfDL._AC_UF1000,1000_QL80_.jpg
- [18] https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRwon2Rd14_Cd7gk3xNthPJvgBjc1yK4kcRVxwjcwSgLYkjF74K
- [19] <https://arduinoakitproject.com/wp-content/uploads/2023/08/nRF24L01-Wireless-Transceiver-Enhanced-ShockBurst-Packet-Structure.webp>.
- [20] <https://www.yiboard.com/data/attachment/forum/202206/21/113411urtr488qlaabtpkt.jpg>
- [21] <https://www.researchgate.net/publication/365123389/figure/fig1/AS:11431281169921247@1687530308586/Diagram-of-GSM-network-5.jpg>.



Chapitre III : Résultats et simulation

III.1. Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre pratique et la validation expérimentale du système intelligent de contrôle climatique développé pour les bâtiments avicoles. Après la définition de l'architecture matérielle et logicielle dans le chapitre précédent, l'accent est mis ici sur la réalisation concrète, les procédures de test et l'évaluation des performances en conditions réelles. Le système comprend une unité centrale de commande et plusieurs nœuds capteurs sans fil répartis dans le bâtiment. L'unité centrale collecte et traite les données environnementales afin de piloter automatiquement les actionneurs tels que les ventilateurs, les chauffages et l'éclairage, tout en assurant la supervision et l'envoi d'alertes via le réseau GSM et une application mobile Android. Le prototype a été testé dans un bâtiment avicole réel, démontrant sa capacité à surveiller et réguler efficacement la température et l'humidité en temps réel. Les essais ont permis de vérifier la précision des capteurs, la fiabilité de la communication sans fil et la réactivité du système. Les résultats obtenus confirment ainsi la faisabilité et l'efficacité du système proposé, qui répond pleinement aux objectifs fonctionnels et de performance fixés lors de la conception.

III .2. Simulation et réalisation du système

III .2.1. Simulation sous Proteus

Avant la réalisation du prototype physique, une simulation a été effectuée à l'aide du logiciel Proteus Professional afin de vérifier le bon fonctionnement du circuit conçu et de valider la logique de commande. Le schéma simulé comprenait le microcontrôleur, le capteur de température DS18B20, le module de communication sans fil NRF24L01, le module GSM A7670C, ainsi qu'un module relais chargé du pilotage des actionneurs. L'objectif de cette simulation était de s'assurer que les données issues du capteur DS18B20 étaient correctement acquises et traitées par la carte Arduino, et que l'algorithme de commande déclenchait le relais lorsque la température dépassait ou descendait en dessous des seuils définis. Les résultats obtenus ont permis de valider le comportement logique du système, confirmant la fiabilité de la conception matérielle et du programme de commande avant le passage à la conception du circuit imprimé (PCB) et à la réalisation pratique du prototype.

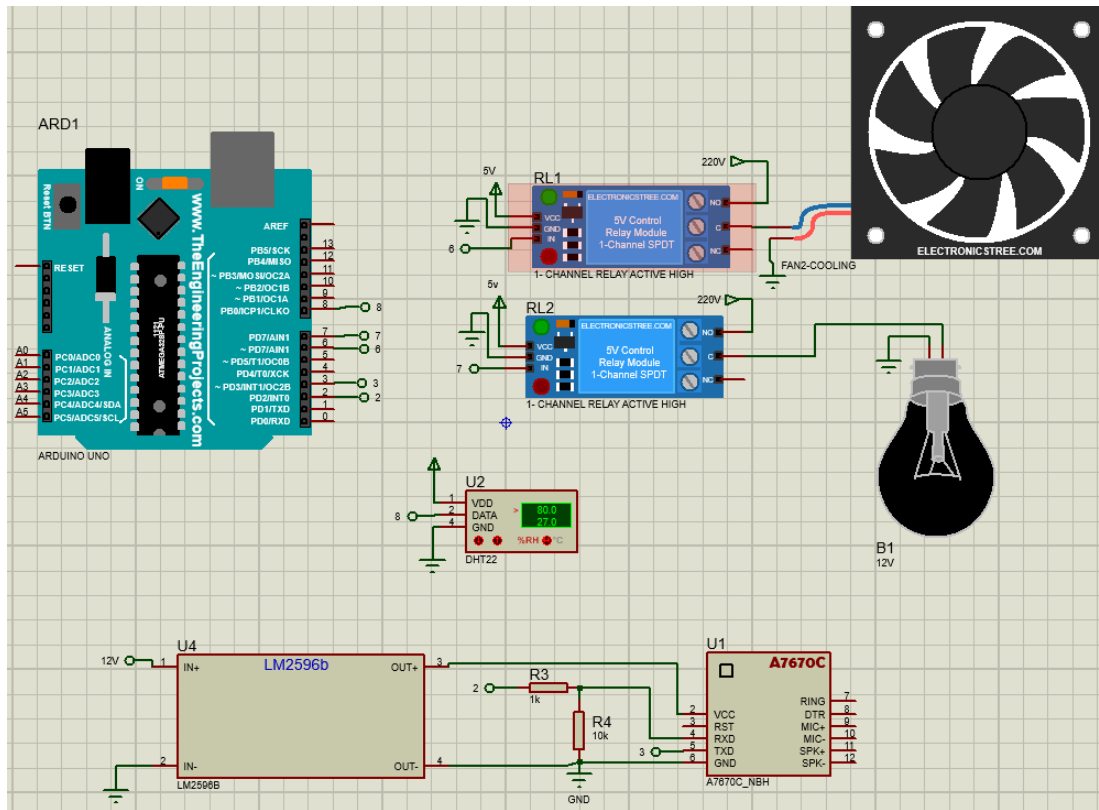


Figure III.1 : Simulation du système intelligent de contrôle de température sous Proteus.

III .2. 2. Conception et réalisation du circuit imprimé

Après la simulation du circuit, l'étape suivante a consisté à concevoir et à fabriquer le circuit imprimé (PCB) du système. La conception a été réalisée à l'aide du logiciel Proteus Professional, où le schéma et le routage ont été finalisés. Une vue 3D du circuit imprimé a également été générée afin de visualiser l'emplacement physique des composants avant la fabrication. La fabrication du PCB a été effectuée au laboratoire selon le procédé de **photolithographie par exposition UV**, comprenant les cinq phases principales suivantes :

- **Première phase : l'insolation**
- **Deuxième phase : la révélation**
- **Troisième phase : la gravure**
- **Quatrième phase : l'élimination**
- **Cinquième phase : le perçage**

Chapitre III : Résultats et simulation

Après ces étapes, tous les composants électroniques ont été soudés sur le circuit, et le prototype complet a été assemblé. Les circuits finaux correspondent à l'**unité centrale de commande** et au **nœud capteur sans fil**, présentés respectivement sur les figures III.5 et III.6.



Figure III.2 : Circuit imprimé final assemblé de l'unité centrale de commande.

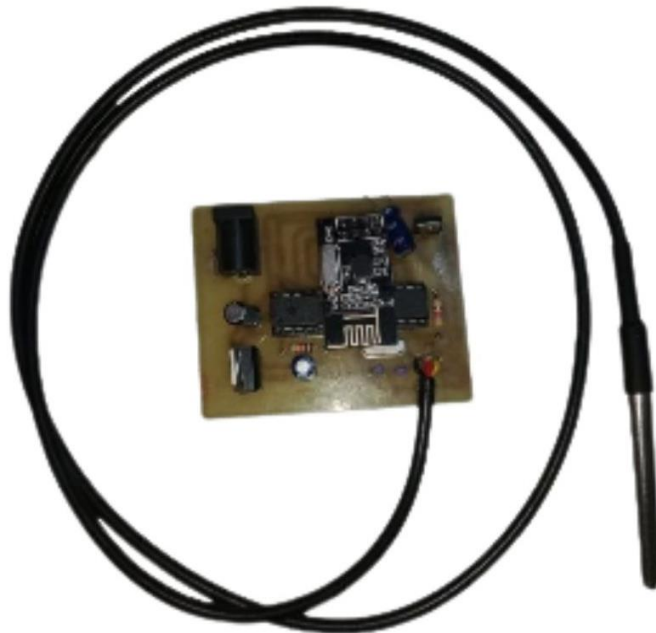


Figure III.3 : Circuit imprimé final assemblé du nœud capteur sans fil.

III .3. Application mobile : Controlify

L'application mobile Controlify a été développée afin d'offrir à l'éleveur une interface intuitive et efficace pour surveiller et contrôler à distance les paramètres environnementaux de son bâtiment. Elle constitue le principal point d'interaction entre l'utilisateur et le système intelligent, permettant la supervision et le contrôle direct des dispositifs connectés via la communication SMS. Développée sous Android Studio en utilisant le langage Kotlin, l'application se distingue par sa simplicité d'utilisation et sa structure modulaire. Elle est composée de quatre sections principales : Tableau de bord, Contrôle, Paramètres et Historique.

III.3.1. Tableau de bord

Le Tableau de bord offre une vue d'ensemble en temps réel sur l'état du système.

Il comprend :

- **Carte de température et d'humidité** : Affiche les dernières valeurs de température et d'humidité pour chaque zone surveillée. Le nombre de zones est configurable dans le menu *Paramètres* selon le nombre de capteurs installés.
- **Carte d'état d'alimentation** : Indique si le système fonctionne sur secteur ou sur batterie de secours.
- **Carte d'état des dispositifs** : Montre l'état de fonctionnement des dispositifs connectés (ventilateurs, chauffages) ainsi que leur mode de commande : manuel, automatique ou cyclique.
- **Chronologie de la température** : Présente un graphique de l'évolution récente de la température et de l'humidité.

Un bouton d'actualisation (icône thermomètre) permet de demander à tout moment la mise à jour des données.



Figure III.4 : Interface du tableau de bord de l'application Controlify.

III.3.2. Panneau de contrôle

La section Contrôle permet de gérer le fonctionnement du système et de commander manuellement les relais.

Elle comprend :

- **Carte de seuils de température** : Permet de définir les températures maximales et minimales. En cas de dépassement, le système envoie automatiquement une alerte à l'utilisateur.
- **Cartes de contrôle des relais (Relais 1 et Relais 2)** : Chaque relais peut fonctionner sous trois modes :
 - Mode Basique : commande manuelle ON/OFF.

Chapitre III : Résultats et simulation

- Mode Cyclique : activation/désactivation automatique selon des durées définies.
- Mode Température : commande automatique selon les seuils de température définis.

Un bouton “Arrêter tout” permet d’éteindre immédiatement tous les dispositifs en cas d’urgence.



Figure III.5 : Interface de contrôle des dispositifs et configuration des relais.

III.3.3. Paramètres

La section Paramètres permet de personnaliser entièrement la configuration du système :

- **Gestion des numéros de téléphone :** Configuration du numéro du module GSM, ainsi que des numéros primaire et secondaire de l'utilisateur.
- **Sélection de la carte SIM :** Permet de choisir la carte SIM utilisée pour la communication SMS sur un téléphone double SIM.

Chapitre III : Résultats et simulation

- **Configuration des capteurs et des zones** : Définit le nombre de zones de mesure de température (jusqu'à quatre) et l'activation optionnelle du capteur d'humidité.
- **Langue de l'interface** : L'application est multilingue et permet de passer de l'anglais à l'arabe.

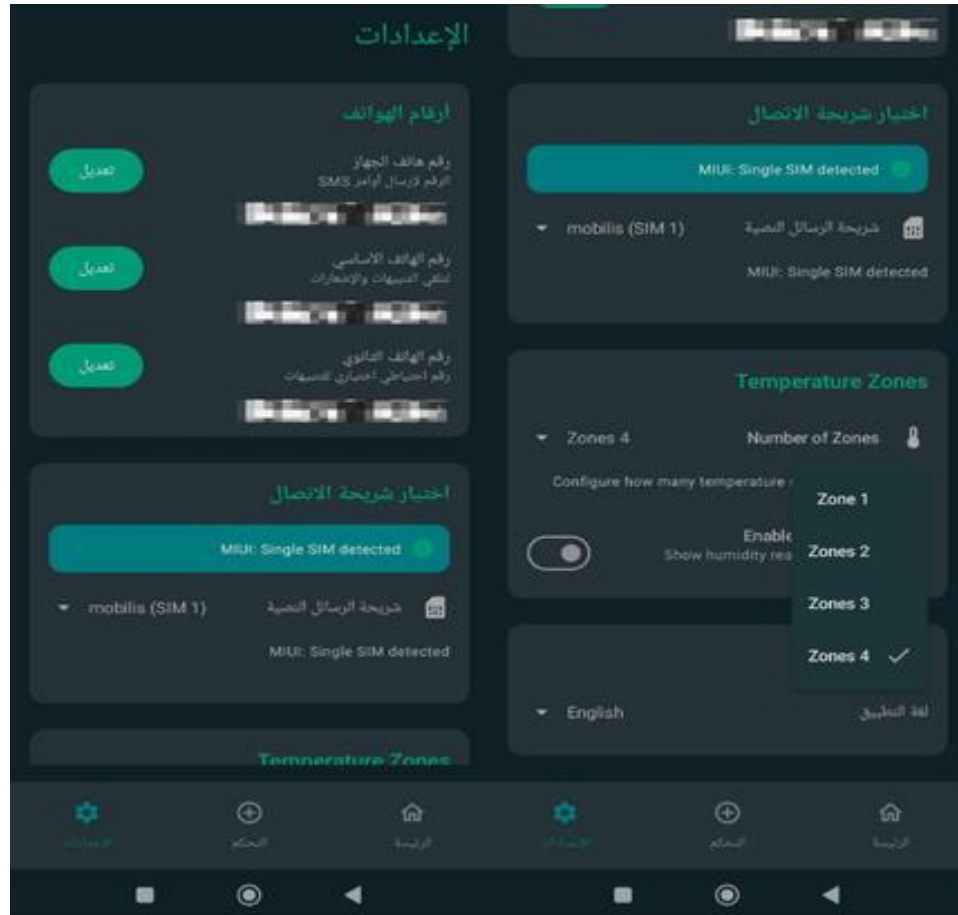


Figure III.6 : Menu des paramètres de l'application Controlify.

III.3.4. Historique

La section Historique affiche la liste chronologique des commandes échangées entre l'utilisateur et le système :

- Requêtes et réponses de température ;
- Commandes de contrôle (ON/OFF, changements de mode, mise à jour des seuils) ;
- Alertes du système (surchauffe, coupure d'alimentation, etc.).

Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de suivre le comportement du système et de vérifier l'exécution des commandes.

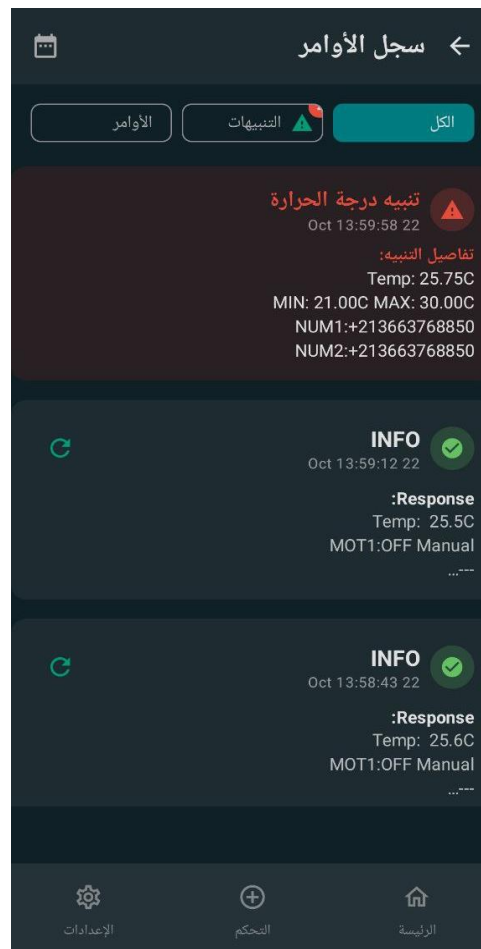


Figure III.7 : Exemple d'historique des commandes.

III.3.5. Discussion

L'application Controlify améliore considérablement l'expérience utilisateur et la flexibilité du système de contrôle climatique. Elle réunit dans une seule plateforme mobile toutes les fonctions essentielles de surveillance, de configuration et de commande, accessibles même sans connexion Internet. Les tests sur le terrain ont démontré une communication stable et une interaction fluide entre le système et l'application.

III.4. Déploiement et tests dans un élevage avicole réel

Après la validation du prototype en laboratoire, le système a été déployé et testé dans un environnement avicole réel afin d'évaluer ses performances en conditions réelles d'exploitation. Cette étape a permis de vérifier la fiabilité de la communication, la précision des mesures de température et la réactivité du système de commande.

III.4.1. Installation et configuration

Le système a été installé dans un bâtiment avicole équipé de dispositifs de chauffage et de ventilation. L'**unité centrale de commande** a été placée dans un endroit sec et surélevé, à proximité de la source d'alimentation, tandis que le **nœud capteur sans fil** a été disposé à hauteur des volailles, au centre du bâtiment, afin d'obtenir des mesures représentatives. Les deux modules ont été alimentés et configurés avec des seuils de température prédéfinis. La communication entre l'unité centrale et le capteur a été assurée par le **module NRF24L01**, tandis que la supervision à distance et l'envoi d'alertes ont été réalisés via le **module GSM A7670C**.

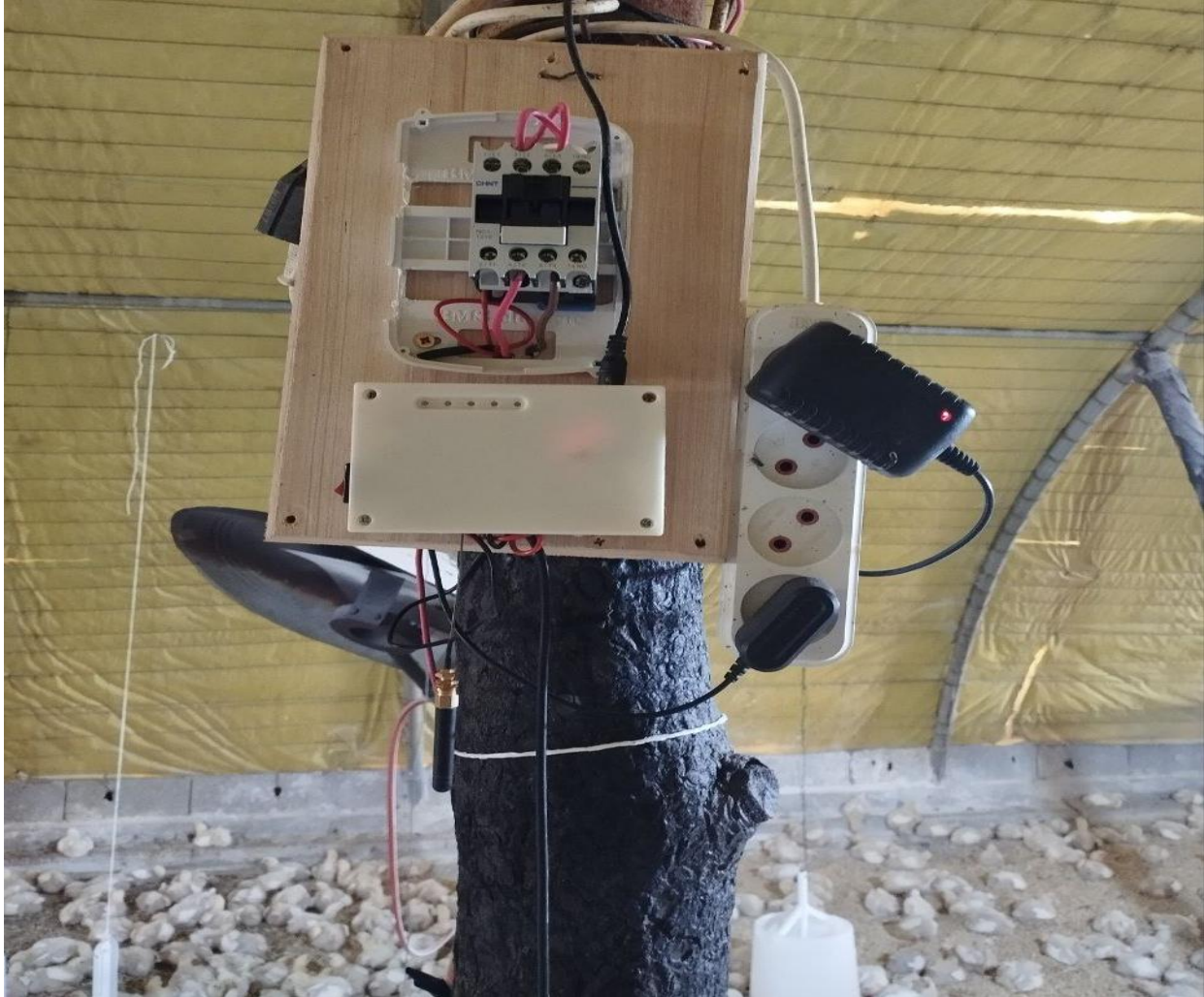


Figure III.8 : Installation de l'unité centrale et du nœud capteur dans le bâtiment avicole.

III.4.2. Tests de fonctionnement

Durant la phase d'essai, le système a mesuré et transmis en continu la température vers l'unité centrale, qui a commandé automatiquement les dispositifs de chauffage ou de ventilation selon les valeurs relevées. Le module GSM envoyait des SMS d'alerte à l'utilisateur lorsque la température dépassait les limites définies.

Les performances du système ont été évaluées selon trois critères principaux :

- **Stabilité de la communication sans fil** entre les modules sur plusieurs mètres ;
- **Précision des mesures de température**, comparée à un thermomètre étalonné ;

Chapitre III : Résultats et simulation

- **Temps de réaction du système de commande**, mesuré entre la détection et l'activation du relais.

L'ensemble des tests a confirmé le bon fonctionnement et la fiabilité du système, capable de maintenir la température dans la plage souhaitée.

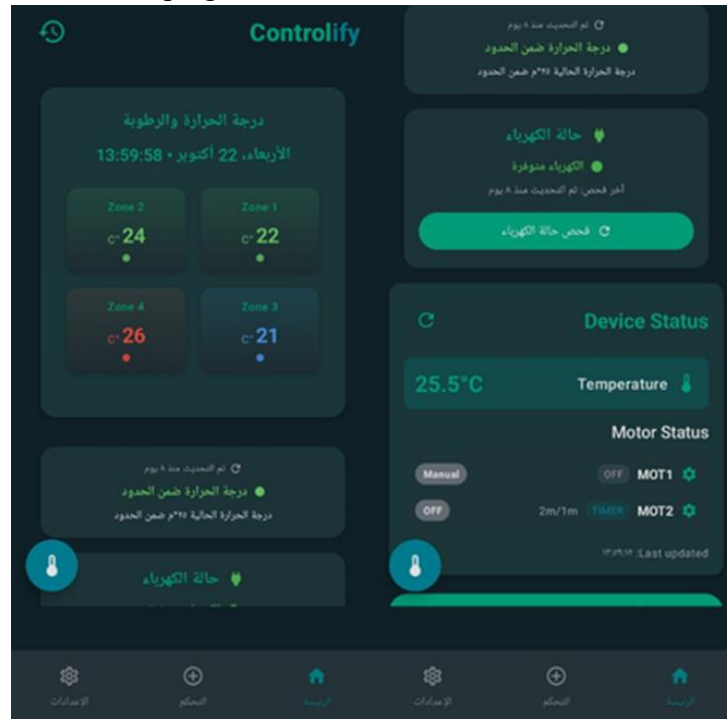


Figure III.9 : Exemple de fonctionnement du système lors des tests sur le terrain.

III.4.3. Retour d'expérience et observations

Selon l'éleveur ayant participé à la phase de test, le système a apporté une nette amélioration du confort de surveillance et une réduction des interventions manuelles. Le capteur sans fil a permis un positionnement flexible à l'intérieur du bâtiment, tandis que les alertes à distance ont assuré une supervision continue, même en dehors des heures de présence. Quelques ajustements mineurs ont été réalisés pour améliorer la stabilité du signal, notamment en optimisant la position des antennes et en garantissant une alimentation stable pour le module GSM. Ces résultats démontrent que le système de contrôle climatique intelligent proposé est non seulement fonctionnel, mais

également adapté à une utilisation pratique dans les exploitations avicoles de petite et moyenne taille.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté la mise en œuvre et la validation expérimentale du système intelligent de contrôle climatique conçu pour les bâtiments avicoles. Après les étapes de conception et de simulation, la phase de réalisation matérielle a été menée avec succès, incluant la fabrication des circuits imprimés et l'assemblage de l'unité centrale de commande ainsi que des nœuds capteurs sans fil. Les tests effectués dans un environnement avicole réel ont confirmé la fiabilité du système, la stabilité de la communication entre les capteurs et l'unité centrale, ainsi que l'efficacité du contrôle automatique du chauffage et de la ventilation selon les seuils programmés. Ces expérimentations ont démontré la capacité du système à maintenir des conditions climatiques optimales pour la volaille, même en présence de variations de température importantes. Parallèlement, le développement de l'application mobile Controlify a permis de doter le système d'une interface conviviale et fonctionnelle pour la supervision et le contrôle à distance. Grâce à ses modules Tableau de bord, Contrôle, Paramètres et Historique, elle offre un accès en temps réel aux données, une configuration flexible et un système d'alerte efficace. Les retours des utilisateurs ont souligné la simplicité d'utilisation et la performance de la solution. En conclusion, cette mise en œuvre valide pleinement le concept d'un système intelligent, autonome, modulaire et économique, capable d'optimiser les conditions climatiques des bâtiments avicoles grâce à l'intégration de technologies embarquées à faible coût.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'aviculture en Algérie, secteur essentiel pour la sécurité alimentaire nationale, fait face à de nombreux défis liés aux conditions climatiques extrêmes et à la gestion manuelle des exploitations. Ce travail de recherche et de réalisation s'est inscrit dans une démarche visant à moderniser la gestion des bâtiments avicoles à travers l'intégration de solutions embarquées intelligentes, accessibles et adaptées au contexte local.

Dans la première partie de ce mémoire, un état de l'art approfondi a permis d'analyser l'évolution du secteur avicole en Algérie, les caractéristiques architecturales et techniques des bâtiments d'élevage, ainsi que les principales technologies de contrôle climatique existantes. Cette étude a mis en évidence la nécessité d'un système automatisé capable de surveiller et d'ajuster les paramètres environnementaux de manière fiable, économique et adaptée aux réalités du terrain. La deuxième partie a porté sur la conception du système intelligent de contrôle climatique. Nous avons défini une architecture modulaire basée sur des microcontrôleurs ATmega328P, des capteurs numériques de température DS18B20, et une communication mixte combinant nRF24L01 (pour le réseau local sans fil) et A7670C (pour la supervision à distance). L'environnement de développement Arduino IDE a permis d'assurer la programmation et la gestion des capteurs et actionneurs, tandis que Android Studio a été utilisé pour concevoir l'application mobile de supervision. La troisième partie a détaillé la réalisation pratique du système, depuis la conception du circuit imprimé sous Proteus jusqu'à la fabrication et l'assemblage des différents modules. Le système complet a ensuite été déployé dans un bâtiment avicole réel, où il a démontré son efficacité dans le suivi de la température et le contrôle automatique des dispositifs de chauffage et de ventilation. Les essais ont validé la stabilité des communications, la précision des mesures et la réactivité des commandes.

Parallèlement, l'application mobile Controlify, développée sous Android, a permis à l'utilisateur de superviser et de contrôler le système à distance de manière simple et intuitive. Grâce à ses fonctionnalités de tableau de bord, de commande, de configuration et d'historique, elle offre une solution complète répondant aux besoins pratiques des éleveurs. Les tests sur le terrain ont confirmé la fiabilité et la convivialité de l'application, même dans des environnements dépourvus de connexion Internet. Les résultats obtenus démontrent que le système proposé constitue une solution intelligente, autonome et à faible coût, capable d'améliorer la productivité et le bien-être des volailles tout en réduisant la charge de travail de l'éleveur. Il contribue ainsi à la modernisation du secteur avicole et ouvre la voie à une gestion plus durable et plus efficace des exploitations agricoles.

En conclusion, ce projet a démontré la faisabilité et l'intérêt d'un système embarqué intelligent pour le contrôle climatique avicole, combinant fiabilité, accessibilité et efficacité. Il constitue

Conclusion Générale

une contribution concrète à l'application des technologies embarquées et de l'Internet des objets (IoT) dans le domaine agricole, ouvrant la voie à de futures innovations dans la gestion automatisée des environnements d'élevage.