الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي – برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Par: - Khiar Billel

Intitulé :

Système embarqué de surveillance climatique pour hangars agricoles et avicoles

Soutenu publiquement, le **18 /06/2026**
Devant le jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M. Reffas Abderrahim	MCA	Président	Univ-BBA
M. Mabrek Abdelhakim	MCA	Examinateur	Univ-BBA
M. Djedoui Layachi	MAB	Examinateur	ESTIN-Bejaia
Me. Boujlal Anfal	MCA	Examinateur Startup	Univ-BBA
M. Zaidi Elyazid	MCA	Encadrant	Univ-BBA
M. Zemmit Fouad	MCA	Encadrant	Univ-BBA

Année Universitaire 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ma mère

À mon père,

Pour leurs sacrifices, leur soutien constant et les valeurs qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours.

À mon frère

À toute ma famille,

Pour leur présence, leurs encouragements et leur patience pendant les périodes de conception, de câblage, d'essais et de rédaction.

Je dédie tout particulièrement ce mémoire

À mon épouse

À mes trois enfants

Qui ont supporté mes absences, mes déplacements et les longues heures consacrées au projet. Leur compréhension et leur soutien ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je dédie ce travail aux agriculteurs et aux éleveurs qui recherchent des solutions simples, accessibles et fiables pour améliorer la sécurité de leurs installations, réduire les pertes et réagir rapidement aux situations critiques.

Remerciements

Je remercie avant tout Elath Tout-Puissant de m'avoir donné la volonté, la patience et la capacité de mener ce travail jusqu'à son terme.

J'adresse mes sincères remerciements à **Mr. ZAIDI Elyazid, MCA**, pour son encadrement, ses remarques méthodologiques et son accompagnement tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie les enseignants du département d'Électromécanique, mes collègues, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation du prototype ModuGarde MG-001.

الملخص:

تقدم هذه المذكرة تصميم وإنجاز نظام **ModuGarde**، وهو نظام ذكي مدمج مخصص للمراقبة الحرارية، والتنظيم المناخي، وإرسال التنبيهات متعددة القنوات داخل الحظائر الزراعية ومباني تربية الدواجن. يعتمد النموذج الأولي على متحكم دقيق من نوع **ESP32-S3**، ومجسمات رقمية لقياس درجة الحرارة، ومرحلات (**Relays**) للتحكم، ووحدة اتصال **GSM**، وساعة زمن حقيقي، ومداخل لمفاتيح نهاية المشوار، بالإضافة إلى واجهة محلية من نوع **WebView** . يتيح النظام قياس درجات الحرارة في عدة نقاط، والتحكم في التهوية والتدفئة والإضاءة، والكشف عن انقطاع التيار الكهربائي، ومراقبة الحالات الفيزيائية المختلفة، وإشعار المستخدم عبر الرسائل النصية القصيرة (SMS) أو المكالمات الهاتفية. كما يدمج النظام وحدة خاصة بتربية الدواجن تحمل اسم **Poultry**، قادرة على إدارة برامج تربية دجاج اللحم والدجاج البياض، وضبط درجات الحرارة اليومية المستهدفة، وتنفيذ برامج الإضاءة المناسبة.يهدف هذا العمل إلى إثبات أن **ModuGarde** ليس مجرد منظم حرارة تقليدي، بل منصة متكاملة للقياس واتخاذ القرار والتنفيذ والتنبيه وحفظ البيانات، بما يتلاءم مع المتطلبات العملية والقيود التشغيلية للمباني الزراعية.

الكلمات المفتاحية:

ModuGarde، ESP32-S3، تربية الدواجن، المراقبة الحرارية، التهوية، GSM، WebView، المرحلات(Relays) ، استمرارية وحفظ البيانات.

Abstract:

This dissertation presents the design and implementation of ModuGarde, an intelligent embedded system dedicated to thermal monitoring, climate regulation and multichannel alerting in agricultural and poultry buildings. The prototype combines an ESP32-S3 controller, digital temperature sensors, relay outputs, a GSM module, a real-time clock, limit-switch inputs and a local WebView interface. The system monitors several temperature points, controls ventilation, heating and lighting, detects power failure, supervises physical states and notifies the user by SMS or phone call. It also integrates a poultry management module supporting broiler and layer profiles, daily thermal setpoints and lighting schedules. The work demonstrates that ModuGarde is not only an improved thermostat, but a complete platform for measurement, decision, action, alerting and persistent storage adapted to real field constraints.

Keywords: ModuGarde, ESP32-S3, poultry, thermal monitoring, ventilation, GSM, WebView, relays, persistence.

Résumé :

Ce mémoire présente la conception et la réalisation de ModuGarde, un système embarqué intelligent destiné à la surveillance thermique, à la régulation climatique et à l'alerte multicanale dans les hangars agricoles et avicoles. Le prototype associe un microcontrôleur ESP32-S3, des sondes de température numériques, des relais de commande, un module GSM, une horloge temps réel, des entrées de fins de course et une interface WebView locale. Le système permet de mesurer plusieurs points de température, de commander la ventilation, le chauffage et l'éclairage, de détecter les coupures secteur, de surveiller des états physiques et de notifier l'utilisateur par SMS ou appel. Il intègre également un module avicole, nommé Poultry, capable de gérer des profils chair et ponte, des consignes thermiques journalières et des programmes lumineux. L'objectif du travail est de démontrer que ModuGarde n'est pas un simple thermostat, mais une plateforme complète de mesure, de décision, d'action, d'alerte et de mémorisation, adaptée aux contraintes pratiques des bâtiments agricoles.

Mots-clés : ModuGarde, ESP32-S3, aviculture, surveillance thermique, ventilation, GSM, WebView, relais, persistance.

Table des matières

Dédicace....2
Remerciements....3
Résumé....4
Abstract....4
Nomenclature....7
Introduction Générale....8
Chapitre 1 : État de l'art sur les systèmes embarqués climatiques et avicoles....10
1.1 Introduction....11
1.2 Hangars agricoles et bâtiments avicoles....12
1.3 Contraintes climatiques en aviculture....12
1.4 Systèmes traditionnels de surveillance et de commande....13
1.5 Capteurs utilisés dans les systèmes agricoles intelligents....14
1.6 Actionneurs et commande par relais....14
1.7 Microcontrôleurs et systèmes embarqués appliqués à l'agriculture....15
1.8 Communication locale : WebView et point d'accès Wi-Fi....16
1.9 Communication GSM : SMS, appels et USSD....17
1.10 Mémoire, persistance et historique....17
1.11 Sécurité fonctionnelle et limitation des fausses alarmes....18
1.12 Positionnement de ModuGarde par rapport aux solutions usuelles....18
1.13 Conclusion....20
Chapitre 2 : Références zootechniques, méthodologie et choix techniques....21
2.1 Introduction....22
2.2 Références zootechniques en aviculture....22
2.2.1 Importance des paramètres climatiques....23
2.2.2 Température optimale des volailles....25
2.2.3 Ventilation et qualité de l'air....27
2.2.4 Éclairage avicole....29
2.3 Méthodologie de conception du système ModuGarde....30
2.3.1 Analyse des besoins....31
2.3.2 Cahier des charges fonctionnel....32
2.3.3 Architecture méthodologique....34
2.4 Choix techniques du système ModuGarde....35
2.4.1 Choix du microcontrôleur....36
2.4.2 Choix des capteurs....37
2.4.3 Choix des actionneurs....38
2.4.4 Choix du système de communication....39
2.5 Architecture matérielle du système....41
2.6 Architecture logicielle....42
2.6.1 Acquisition des données....44
2.6.2 Traitement des données....45
2.6.3 Contrôle automatique....46
2.6.4 Interface de supervision....48
2.7 Critères de choix techniques....49
2.8 Sécurité et fiabilité du système....50
2.9 Avantages du système ModuGarde....51
2.10 Conclusion....53
Chapitre 3 : Réalisation expérimentale....54
3.1 Introduction....55
3.2 Problématique....55
3.3 Solutions proposées traditionnelles....56
3.4 Solution proposée dans notre projet étudié....56
3.5 Composants....57

3.6 Description du banc expérimental 58
3.7 Architecture logicielle et programme embarqué 60
3.7.1 Gestion logicielle des SMS et des commandes distantes 60
3.8 Interface WebView et supervision locale 61
3.8.1 Intégration des commandes SMS dans la supervision locale 61
3.9 Notifications GSM, appels et acquittement 63
3.9.1 Types d'événements notifiés 64
3.9.2 Modes de notification 64
3.9.3 Commandes SMS à distance 65
3.9.4 Principe d'acquittement 65
3.9.5 Acquittement par appel entrant 66
3.9.6 Différence entre ACK, silence et maintenance 66
3.10 Essais expérimentaux et validation 67
3.10.1 Validation du démarrage et de la supervision locale 67
3.10.2 Validation des seuils de température 68
3.10.3 Validation de la coupure secteur 68
3.10.4 Validation des fins de course 68
3.10.5 Validation des SMS, appels et acquittements 69
3.10.6 Tableau général de validation expérimentale 70
3.11 Résultats obtenus et discussion 71
3.12 Conclusion 73
Conclusion générale 75
Références bibliographiques 76
Annexes 77

Liste des figures

Figure 1-1 Chaîne fonctionnelle du système climatique ModuGarde. 11
Figure 1-2 Architecture locale et GSM de ModuGarde. 16
Figure 1-3 Exemple de supervision ModuGarde en environnement avicole. 19
Figure 2-1 Paramètres climatiques et zootechniques en aviculture. 23
Figure 2-2 Exemple d'évolution de la consigne thermique en aviculture. 27
Figure 2-3 Architecture méthodologique de conception du système ModuGarde. 31
Figure 2-4 Cartographie fonctionnelle simplifiée des broches ESP32-S3. 37
Figure 2-5 Architecture logicielle du firmware ModuGarde. 44
Figure 2-6 Logique de contrôle automatique : de la mesure vers l'action. 47
Figure 2-7 Principe du module avicole Poultry intégré à ModuGarde. 52
Figure 3-1 Boîtier principal ModuGarde MG-001. 57
Figure 3-2 Vue interne du prototype pendant les essais. 59
Figure 3-3 Vue rapprochée de la carte et du câblage. 59
Figure 3-4 Organisation des raccordements de la maquette. 59
Figure 3-5 Page d'accueil WebView du système. 63
Figure 3-6 Présentation du système ModuGarde avec supervision locale. 63
Figure 3-7 Démonstrateur réduit pour la soutenance. 69
Figure 3-8 Chaîne de validation expérimentale proposée. 69
Figure 3-9 Support de communication et de valorisation du système. 73

Liste des tableaux

Tableau N.1 Abréviations principales du mémoire 7
Tableau 1.1 Comparaison entre commande manuelle, thermostat isolé et ModuGarde. 13
Tableau 1.2 Fonctions assurées par ModuGarde. 19
Tableau 2.1 Repères zootechniques utilisés pour la conception. 25
Tableau 2.2 Températures de référence simplifiée selon l'âge. 27
Tableau 2.3 Cahier des charges fonctionnel du système ModuGarde. 34
Tableau 2.4 Choix techniques retenus pour le prototype. 35

Tableau 2.5 Cartographie finale des broches utilisées. 42
Tableau 2.6 Critères de choix techniques appliqués au prototype..... 49
Tableau 2.7 Mécanismes de sécurité et de fiabilité. 51
Tableau 3.1 Composants matériels utilisés dans le prototype. 58
Tableau 3.2 Exemple de commandes SMS intégrées à ModuGarde. 62
Tableau 3.3 Modes de notification utilisés dans ModuGarde. 64
Tableau 3.4 Loi d'acquittement par SMS. 65
Tableau 3.5 Loi d'acquittement par appels entrants. 66
Tableau 3.6 Comparaison des niveaux d'acquittement. 67
Tableau 3.7 Scénarios de validation GSM et acquittement. 69
Tableau 3.8 Synthèse des essais expérimentaux. 70
Tableau 3.9 Synthèse des résultats et limites. 72
Tableau 3.10 Endpoints API utiles pour le diagnostic local. 72

Nomenclature

Abréviation	Signification
AP	Point d'accès Wi-Fi local créé par le système pour accéder à l'interface sans routeur externe.
DS18B20	Sonde numérique de température utilisant un bus 1-Wire, retenue pour la mesure thermique.
DS3231	Horloge temps réel I2C utilisée pour les dates, les horaires et les programmes lumineux.
ESP32-S3	Microcontrôleur principal assurant acquisition, traitement, WebView et commande des sorties.
FC	Fin de course, contact physique utilisé pour représenter un état mécanique.
GSM	Communication mobile utilisée pour SMS, appels et requêtes USSD.
LittleFS	Système de fichiers interne utilisé pour certaines sauvegardes et l'historique.
NVS	Mémoire non volatile utilisée pour conserver les paramètres critiques.
Poultry	Module avicole intégré au firmware pour profils chair et ponte.
RTC	Real Time Clock, horloge temps réel.
SIM800L	Module GSM utilisé pour les notifications à distance.
WebView	Interface web locale consultable à partir d'un smartphone ou ordinateur.

Introduction Générale

Les hangars agricoles modernes et les bâtiments avicoles exigent une surveillance régulière de l'ambiance intérieure. La température, la ventilation, l'éclairage, l'état de l'alimentation secteur et les alarmes techniques influencent directement la sécurité de l'installation, la qualité de conduite de l'élevage et la rapidité d'intervention de l'exploitant.

Dans de nombreuses exploitations, ces opérations restent encore manuelles. L'utilisateur observe l'état du bâtiment, décide d'allumer ou d'éteindre un ventilateur, vérifie les fins de course, contrôle l'éclairage et intervient lorsqu'une coupure ou une anomalie apparaît. Cette méthode peut fonctionner dans une petite installation, mais elle devient risquée lorsque les variations climatiques sont rapides ou lorsque l'utilisateur n'est pas présent.

Le présent travail s'inscrit dans ce contexte. Il ne vise pas seulement la réalisation d'une carte électronique, mais l'intégration d'un système complet capable de mesurer, décider, commander, notifier, mémoriser et reprendre correctement son fonctionnement après une coupure. La solution étudiée porte le nom de ModuGarde MG-001, ou موديجارد en arabe.

L'originalité du système réside dans la combinaison de plusieurs fonctions dans un même firmware. ModuGarde ne se limite pas à un thermostat ou à une minuterie. Il fournit une interface WebView locale, une logique de notification GSM, des règles de priorités, une gestion de relais réservés, des historiques, une mémoire persistante et un module avicole capable d'appliquer des profils chair ou ponte.

Le système a été pensé pour une exploitation locale sans dépendance obligatoire à Internet. Cette orientation correspond aux contraintes des zones agricoles, où le réseau fixe n'est pas toujours disponible, alors que la couverture GSM reste souvent suffisante pour l'envoi d'alertes. L'utilisateur peut ainsi intervenir à partir d'un téléphone, tout en conservant une supervision locale par Wi-Fi.

Ce travail se subdivise en trois chapitres *:*

Le premier chapitre présente l'état de l'art des systèmes embarqués climatiques et avicoles.

Le deuxième chapitre développe les références zootechniques, la méthodologie de conception et les choix techniques retenus.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation expérimentale, au câblage, au firmware, à l'interface WebView, aux essais et aux limites du prototype.

En conclusion,

.

Chapitre 1 :

État de l'art sur les systèmes embarqués climatiques et avicoles

Chapitre 1 :
État de l'art sur les systèmes embarqués climatiques et avicoles

1.1 Introduction

L'automatisation agricole moderne repose sur l'association de capteurs, de microcontrôleurs, d'actionneurs et de moyens de communication. Dans un hangar agricole ou avicole, la décision ne dépend pas d'un seul paramètre. La température, l'état de l'alimentation électrique, les organes mécaniques, l'éclairage et les alarmes doivent être analysés ensemble pour produire une réponse cohérente [1].

Un système embarqué climatique ne doit donc pas se limiter à lire une valeur. Il doit vérifier la validité de la mesure, appliquer des seuils adaptés, éviter les démarrages répétés, enregistrer les événements, informer l'utilisateur et assurer une reprise correcte après redémarrage. Cette logique explique le passage des commandes simples vers des systèmes intégrés.

Dans ce chapitre, l'état de l'art est présenté à partir du besoin réel du terrain. Les solutions manuelles, les thermostats, les automates programmables, les cartes embarquées, les interfaces WebView et les communications GSM sont analysés afin de positionner ModuGarde par rapport aux solutions usuelles.

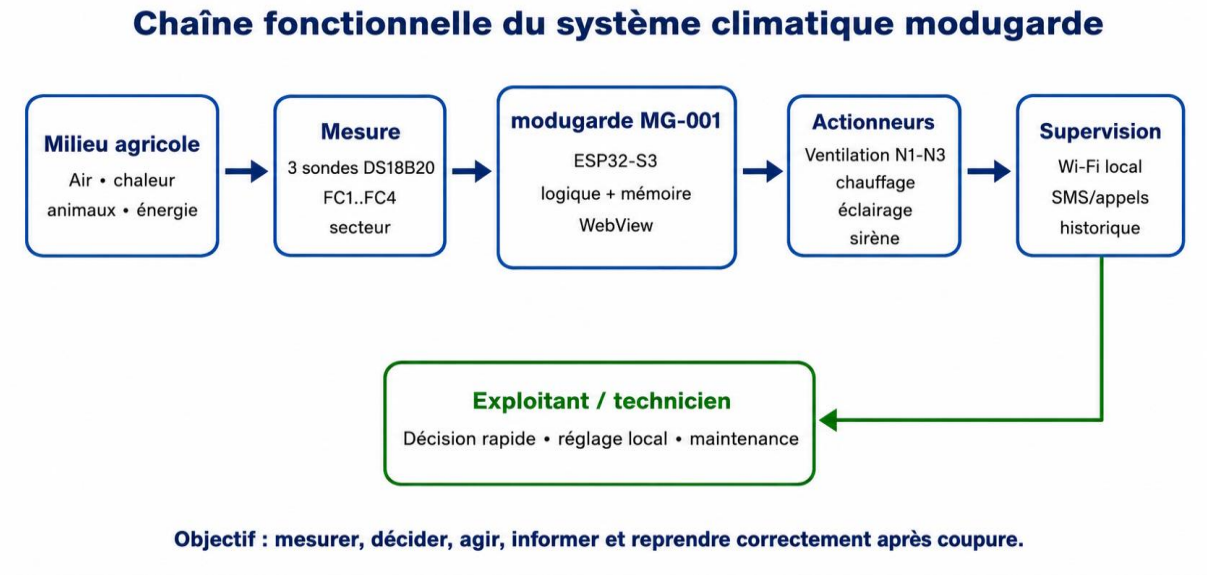


Figure 1-1 Chaîne fonctionnelle du système climatique ModuGarde.

1.2 Hangars agricoles et bâtiments avicoles

Un hangar agricole est un environnement dynamique. Les apports solaires, la ventilation naturelle, l'isolation, la présence d'animaux, les moteurs, l'éclairage et la saison modifient rapidement les conditions intérieures. Une solution de commande doit donc s'adapter à des changements continus plutôt qu'à une situation fixe [2].

Dans un bâtiment avicole, la densité animale ajoute une contrainte importante. Les animaux produisent de la chaleur et des gaz. Lorsque la ventilation est insuffisante, la température augmente et la qualité de l'air se dégrade. Lorsque la ventilation est excessive, les jeunes animaux peuvent subir un refroidissement. Le système doit donc rechercher un équilibre [3].

La supervision doit aussi tenir compte de la disponibilité de l'exploitant. Les défauts peuvent apparaître la nuit, pendant une absence ou lorsque l'utilisateur travaille dans une autre zone. La valeur d'un système comme ModuGarde réside dans sa capacité à poursuivre la surveillance et à transmettre une information utile au bon moment [4].

Les contraintes mécaniques ne doivent pas être négligées. Les volets, portes, fins de course, moteurs et ventilateurs possèdent des états physiques réels. Un système fiable doit relire ces états après redémarrage au lieu de restaurer aveuglément un ancien état de relais.

1.3 Contraintes climatiques en aviculture

En aviculture, l'ambiance intérieure influence directement le confort, la croissance et le comportement des volailles. Les poussins ont besoin d'une ambiance chaude et stable, alors que les sujets plus âgés nécessitent davantage de renouvellement d'air. La consigne thermique évolue donc avec l'âge du lot.

La température est le paramètre le plus visible, mais elle n'est pas indépendante. La vitesse d'air, la concentration de gaz, la poussière, la qualité de la litière et l'éclairage participent aussi au confort des animaux. Un système de commande doit intégrer cette réalité même si toutes les grandeurs ne sont pas mesurées dans la première version du prototype.

La régulation doit également rester progressive. Un démarrage brutal de tous les ventilateurs peut créer un choc thermique. À l'inverse, une réaction trop lente peut laisser la

température dépasser le niveau acceptable. Cette contrainte justifie la ventilation étagée et l'utilisation d'hystérésis.

Ces paramètres permettent de relier l'électronique aux besoins biologiques. La qualité du projet ne se mesure pas seulement au fonctionnement des relais, mais aussi à la pertinence de la logique de commande appliquée au bâtiment.

1.4 Systèmes traditionnels de surveillance et de commande

Les premières solutions de contrôle utilisées dans les bâtiments agricoles sont souvent manuelles. L'exploitant allume ou éteint les ventilateurs, règle le chauffage, ouvre les volets ou contrôle les lampes selon son expérience. Cette méthode reste simple, mais elle dépend fortement de la présence humaine.

Les thermostats isolés améliorent cette situation en automatisant une partie de la commande thermique. Cependant, ils se limitent généralement à un seuil et une sortie. Ils ne gèrent pas toujours l'historique, les priorités, les notifications à distance, la supervision des contacts mécaniques ou la reprise intelligente après coupure.

Les automates programmables industriels offrent une solution robuste. Ils sont adaptés aux environnements sévères et aux installations professionnelles. Toutefois, leur coût, leur environnement de programmation et leur maintenance peuvent être moins accessibles dans une petite exploitation.

Les cartes embarquées connectées représentent une alternative. Elles permettent de développer une logique personnalisée, une interface web, des notifications et des sauvegardes. Elles exigent cependant une attention particulière concernant l'alimentation, la protection des entrées et la stabilité du firmware [5].

Tableau 1.1 Comparaison entre commande manuelle, thermostat isolé et ModuGarde.

Critère	Commande manuelle	Thermostat isolé	ModuGarde
Présence utilisateur	Nécessaire régulièrement	Réglage ponctuel	Supervision continue avec notifications
Historique	Absent	Généralement absent	Événements enregistrés

Communication	Aucune	Rare	WebView, SMS, appels
Gestion des défauts	Observation humaine	Limitée à la température	Capteurs, GSM, secteur, fins de course
Reprise après coupure	Manuelle	Variable	Configuration persistante et lecture physique

1.5 Capteurs utilisés dans les systèmes agricoles intelligents

Un capteur transforme une grandeur physique en information exploitable par le système de commande. Dans un hangar avicole, les grandeurs intéressantes sont la température, l'humidité, la qualité de l'air, la présence d'alimentation, l'état des contacts mécaniques et parfois la luminosité.

La mesure thermique est essentielle car elle constitue la base de la ventilation et du chauffage. Le choix d'un capteur numérique comme le DS18B20 permet de réduire les erreurs liées aux conversions analogiques et facilite la lecture par le microcontrôleur [6].

La position des capteurs est aussi importante que leur technologie. Une sonde placée trop près d'un ventilateur, d'une source de chaleur ou d'une paroi froide peut donner une image fausse de l'ambiance. L'utilisation de plusieurs sondes permet de détecter des écarts entre zones et d'améliorer le diagnostic.

Les fins de course jouent le rôle de capteurs d'état. Ils permettent de savoir si une porte, un volet ou une position mécanique est ouverte ou fermée. Cette information est utile pour déclencher une alarme ou commander une sortie selon une règle configurée.

1.6 Actionneurs et commande par relais

Les actionneurs permettent au système d'agir sur l'environnement. Dans un prototype agricole, les relais sont très utilisés car ils peuvent commander des charges variées : ventilateurs, lampes, chauffage, sirène, contacteurs ou sorties auxiliaires.

La commande par relais est simple à comprendre pour l'utilisateur. Une sortie active correspond généralement à un équipement allumé. Cette simplicité est importante dans un environnement où l'exploitant doit pouvoir diagnostiquer rapidement le fonctionnement sans logiciel spécialisé.

Toutefois, un relais ne doit pas être considéré comme une sortie totalement libre. Dans un système multicanal, plusieurs modules peuvent demander la même sortie au même moment. Un module température, une fin de course, une alarme secteur ou le module Poultry peuvent entrer en conflit si aucune règle de priorité n'est définie.

La séparation d'un relais réservé à la sirène est une solution logique. Elle évite que l'alarme sonore soit confondue avec une sortie de ventilation ou d'éclairage. Dans ModuGarde, le relais 7 est réservé à cette fonction, tandis que les autres relais restent configurables selon les besoins.

1.7 Microcontrôleurs et systèmes embarqués appliqués à l'agriculture

Un microcontrôleur est une unité de traitement capable de lire des entrées, de commander des sorties et d'exécuter un programme embarqué. Dans les applications agricoles, il permet de construire des systèmes moins coûteux et plus flexibles que certaines solutions industrielles complètes.

L'ESP32-S3 se distingue par son nombre de broches, sa connectivité Wi-Fi, sa puissance de calcul et sa compatibilité avec des environnements de développement accessibles. Il peut héberger un serveur web local, communiquer avec des capteurs et commander plusieurs relais [7].

L'intégration d'une carte embarquée dans un système agricole impose toutefois des précautions. Les entrées doivent être protégées, les masses doivent être correctement câblées, les charges inductives doivent être isolées et l'alimentation doit être dimensionnée pour éviter les redémarrages intempestifs.

1.8 Communication locale : WebView et point d'accès Wi-Fi

La communication locale permet à l'utilisateur de consulter et de modifier les paramètres sans ouvrir le boîtier ni reprogrammer le microcontrôleur. Dans ModuGarde, cette communication repose sur un point d'accès Wi-Fi créé par l'ESP32-S3 [8].

L'interface WebView est accessible à partir d'un smartphone, d'une tablette ou d'un ordinateur. Cette solution ne nécessite pas d'application installée, de routeur externe ou de connexion Internet. Elle est donc adaptée aux exploitations isolées.

Les pages de supervision doivent être organisées par usage : état général, relais, téléphones, fins de course, modules, historique et réglages. Cette séparation rend l'interface compréhensible pour un utilisateur non spécialiste.

Le système doit également vérifier que le point d'accès Wi-Fi est réellement opérationnel. La différence entre l'état demandé et l'état réel du SoftAP évite d'afficher une confirmation fausse lorsque le Wi-Fi n'a pas correctement démarré.

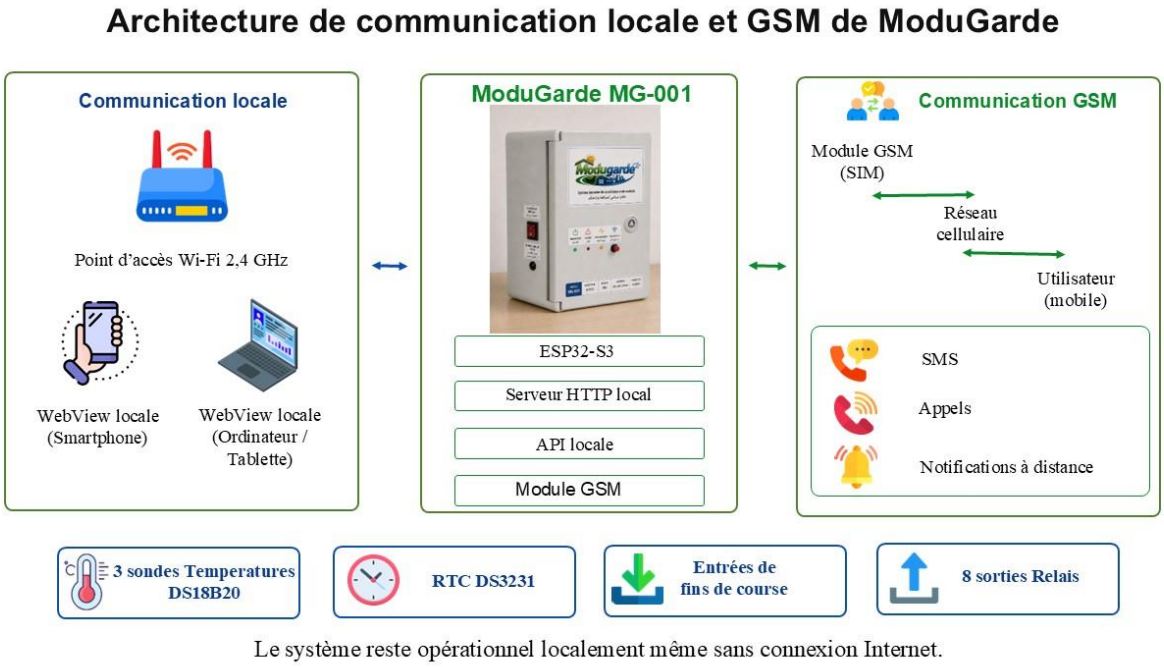


Figure 1-2 Architecture locale et GSM de ModuGarde.

1.9 Communication GSM : SMS, appels et USSD

Le GSM complète l'interface locale. Dans une installation agricole, l'utilisateur peut être éloigné du hangar au moment d'une alarme. L'envoi d'un SMS, le déclenchement d'un appel ou la consultation du solde par USSD permet une réaction plus rapide.

Le module SIM800L est souvent utilisé dans les prototypes car il est disponible et compatible avec les commandes AT. Il exige cependant une alimentation stable et suffisamment puissante, car les transmissions peuvent provoquer des pics de courant [9].

Une communication GSM fiable ne doit pas bloquer toute la supervision. Si le réseau est indisponible, le système doit continuer à lire les capteurs, commander les relais et enregistrer les

événements. Les notifications peuvent être mises en file d'attente pour une tentative ultérieure. Il est aussi important de séparer la notification de l'action physique. Par exemple, un relais de ventilation ou une sirène ne doit pas rester activé uniquement parce qu'un SMS n'a pas pu être envoyé. Le retour normal doit dépendre de la condition physique, pas du succès de la communication.

1.10 Mémoire, persistance et historique

Un système destiné à fonctionner en continu doit conserver ses paramètres après coupure totale. Les numéros de téléphone, les seuils, les relais choisis, les règles de fins de course et les profils avicoles ne doivent pas disparaître après redémarrage.

La persistance ne consiste pas seulement à écrire une configuration. Le système doit vérifier que l'écriture est valide, éviter de mélanger historique et paramètres critiques et relire les conditions physiques réelles au démarrage. Une restauration aveugle peut activer une sortie alors que la condition correspondante n'existe plus.

L'historique est un outil de diagnostic. Il permet de comprendre qu'un relais a été activé, qu'une coupure secteur a été détectée, qu'un SMS a échoué ou qu'un redémarrage s'est produit. Il aide aussi à défendre le fonctionnement devant un jury, car il prouve que les événements sont détectés et enregistrés [10].

Dans ModuGarde, la mémoire non volatile et le système de fichiers interne sont utilisés de façon complémentaire. Cette séparation contribue à protéger les configurations critiques tout en conservant une trace des événements récents.

1.11 Sécurité fonctionnelle et limitation des fausses alarmes

Un faux positif est une alarme déclenchée alors que la situation réelle ne le justifie pas. Dans un hangar, les faux positifs peuvent provenir de rebonds de contacts, de parasites électriques, d'une sonde momentanément invalide ou d'une lecture instable au démarrage.

Si le système déclenche trop d'alarmes inutiles, l'utilisateur finit par les ignorer. La sécurité réelle diminue alors malgré la présence de notifications. Il est donc essentiel de filtrer les entrées, de confirmer les défauts et de séparer les seuils ON et OFF.

L'hystérésis évite les commutations rapides. Un ventilateur ne doit pas démarrer et s'arrêter toutes les secondes autour d'une même température. Les temporisations anti-cycle protègent les relais et les équipements commandés.

La sécurité fonctionnelle passe aussi par l'exploitabilité. L'utilisateur doit comprendre pourquoi une sortie est active : température élevée, coupure secteur, fin de course, commande manuelle ou module Poultry. L'interface et l'historique jouent donc un rôle important [11].

1.12 Positionnement de ModuGarde par rapport aux solutions usuelles

ModuGarde se situe entre le thermostat, l'automate programmable et le système d'alarme. Il ne possède pas le coût ni la complexité d'un automate industriel complet, mais il dépasse largement la fonction d'un thermostat isolé.

La différence principale est l'intégration. Dans une installation traditionnelle, l'utilisateur peut employer une minuterie pour l'éclairage, un thermostat pour la température, une sirène séparée et un relais pour la coupure secteur. Cette séparation complique la maintenance et ne fournit pas une vision globale.

ModuGarde regroupe ces fonctions dans une architecture unique : mesure, commande, WebView, GSM, historique, persistance et module avicole. Cette intégration permet une supervision plus cohérente, tout en restant adaptée à un prototype universitaire [12].

Le système reste évolutif. Une version industrielle pourrait ajouter des protections électriques, des connecteurs normalisés, un boîtier plus robuste, des capteurs d'humidité ou de gaz et une validation terrain prolongée.



Figure 1-3 Exemple de supervision ModuGarde en environnement avicole.

Tableau 1.2 Fonctions assurées par ModuGarde.

Fonction	Description
Surveillance thermique	Lecture de plusieurs sondes DS18B20, détection de défauts et analyse des seuils.
Commande relais	Pilotage de huit sorties avec sirène dédiée, réservations et priorités.
Supervision mécanique	Quatre fins de course configurables selon l'état physique réel.
Communication	WebView locale, API HTTP, SMS, appels et USSD.
Poultry	Profils chair et ponte, température cible quotidienne, lumière et ventilation étagée.
Persistance	Sauvegarde des paramètres, historique et reprise cohérente après redémarrage.

1.13 Conclusion

L'état de l'art montre que la surveillance climatique agricole ne peut pas être réduite à une commande simple. Les contraintes de terrain imposent une mesure continue, une action graduelle, une mémoire fiable, une communication locale et distante, ainsi qu'une présentation claire pour l'utilisateur.

Dans ce contexte, ModuGarde représente une solution intégrée adaptée aux hangars agricoles et avicoles. Le chapitre suivant développe les références zootechniques, la méthodologie de conception et les choix techniques qui ont conduit à l'architecture finale du prototype.

Chapitre 2 :

Références zootechniques, méthodologie et choix techniques

Chapitre 2 :
Références zootechniques, méthodologie et choix techniques

2.1 Introduction

La conception de ModuGarde ne peut pas être évaluée uniquement sous l'angle électronique. Un système destiné à l'aviculture doit être cohérent avec les besoins des animaux, les contraintes du bâtiment, les capacités matérielles du prototype et le niveau de maîtrise de l'utilisateur final.

La conception du système repose sur une relation entre trois domaines : la zootechnie, l'électromécanique et l'informatique embarquée. La zootechnie apporte les consignes et les besoins biologiques. L'électromécanique apporte les actionneurs, les relais, l'alimentation et les protections. L'informatique embarquée apporte l'acquisition, la logique de décision, l'interface et la communication.

Cette organisation évite une erreur fréquente dans les prototypes : assembler des composants sans expliquer pourquoi ils sont nécessaires. Dans ModuGarde, chaque composant correspond à une fonction précise : mesurer, commander, alerter, mémoriser, afficher ou sécuriser.

2.2 Références zootechniques en aviculture

L'aviculture moderne repose sur la maîtrise des paramètres d'ambiance. Les volailles sont particulièrement sensibles aux variations climatiques, notamment pendant les premiers jours de vie. Une température inadéquate, une ventilation insuffisante ou un éclairage irrégulier peuvent provoquer un stress et réduire les performances du lot [13].

Les références zootechniques ne constituent pas des valeurs fixes universelles. Elles dépendent du type de volaille, de la souche, de l'âge, du bâtiment, de la densité, de la saison et de la conduite de l'éleveur. Le rôle du système embarqué est donc d'offrir une base configurable, non d'imposer une valeur unique [14].

Dans ModuGarde, cette logique est intégrée à travers le module Poultry. Celui-ci organise les profils de conduite, les consignes thermiques, les horaires d'éclairage, la ventilation étagée et le chauffage. Il fournit à l'utilisateur une structure de décision tout en laissant la possibilité d'ajuster les paramètres.

Le mémoire distingue clairement les paramètres réellement mesurés par le prototype et ceux qui sont présentés comme références ou perspectives. La température est mesurée par les sondes DS18B20. L'humidité et la qualité de l'air sont indispensables en zootechnie, mais elles ne doivent pas être présentées comme mesurées si aucun capteur dédié n'est intégré.

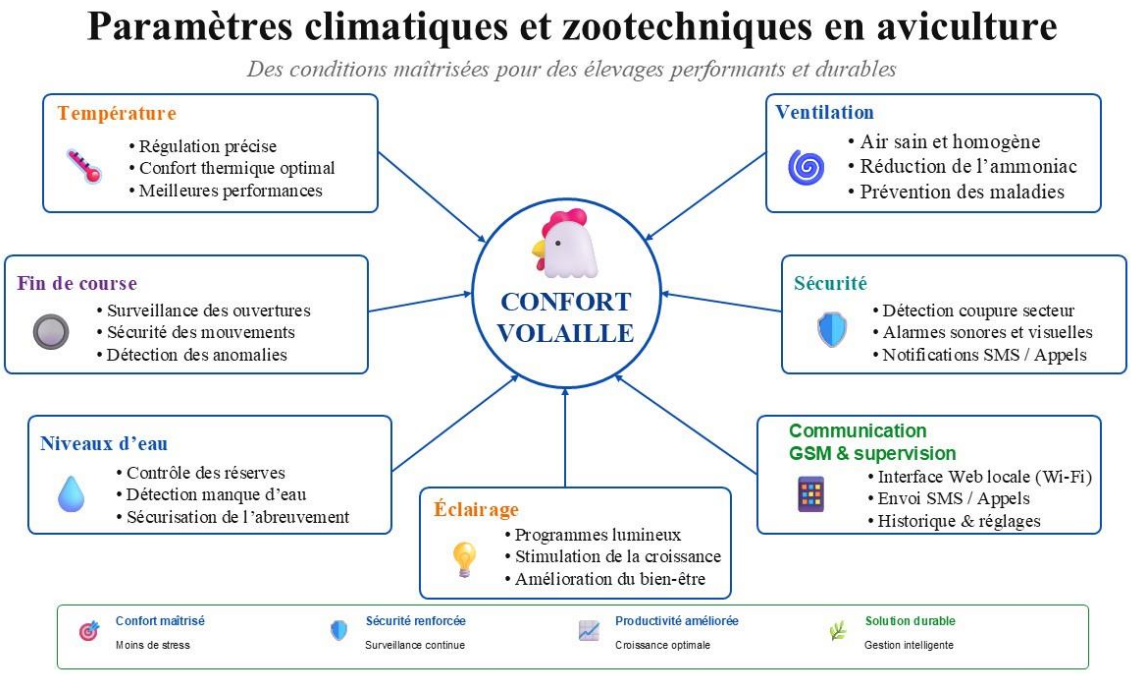


Figure 2-1 Paramètres climatiques et zootechniques en aviculture.

2.2.1 Importance des paramètres climatiques

Les paramètres climatiques influencent directement le confort et le comportement des volailles. Lorsque l'ambiance est équilibrée, les animaux se répartissent correctement dans le bâtiment, consomment normalement et expriment moins de signes de stress. Une ambiance mal réglée entraîne au contraire des regroupements, une agitation ou une baisse d'activité.

La température agit sur le confort thermique. L'humidité influence la litière, les poussières et la sensation de chaleur. La ventilation renouvelle l'air, évacue l'humidité et réduit les gaz.

L'éclairage organise le rythme d'activité. Ces paramètres doivent donc être analysés ensemble. [15].

Un système automatique doit aussi prendre en compte la rapidité des variations. Une hausse de température peut être progressive pendant la journée ou brusque en cas d'arrêt de ventilation. Une coupure secteur peut annuler simultanément plusieurs fonctions. La commande doit donc réagir de manière structurée et hiérarchisée.

Dans ModuGarde, la température est le déclencheur principal des décisions climatiques. Toutefois, l'interface et l'architecture ont été pensées pour permettre l'ajout futur d'autres capteurs. Cette approche modulaire évite de fermer le système à une seule grandeur physique.

Le rôle de l'éleveur reste essentiel. Les capteurs donnent des valeurs, mais l'observation du comportement animal demeure un indicateur pratique. Le système aide à décider, mais il ne remplace pas totalement la surveillance humaine.

Sur le plan pratique, la lecture d'un paramètre climatique ne suffit pas. Il faut aussi interpréter sa tendance. Une température qui monte rapidement n'a pas la même signification qu'une température légèrement élevée mais stable. Cette notion justifie l'idée d'une supervision continue et non d'un contrôle ponctuel.

La densité animale agit aussi sur le climat intérieur. Plus le nombre de sujets est élevé, plus la production de chaleur et d'humidité augmente. La ventilation devient donc une fonction de sécurité, mais aussi une fonction de confort et de performance d'élevage [16].

Pour la conception de ModuGarde, ces paramètres ont été transformés en besoins fonctionnels : mesurer la température, afficher l'état, déclencher les relais, signaler l'alarme et conserver une trace. Cette transformation du besoin biologique vers la fonction technique est l'un des points essentiels du chapitre.

Dans une installation réelle, les paramètres climatiques doivent être considérés comme un ensemble. Une température correcte ne garantit pas forcément une bonne ambiance si l'air est

chargé d'humidité ou si les gaz ne sont pas évacués. Cette vision globale justifie la place importante donnée à la ventilation dans la conception du système.

Le suivi climatique a aussi une dimension économique. Une ventilation mal réglée peut augmenter la consommation électrique, tandis qu'un chauffage mal commandé peut provoquer une dépense inutile. Un système automatique bien paramétré aide donc à stabiliser l'élevage et à mieux utiliser l'énergie.

Tableau 2.1 Repères zootechniques utilisés pour la conception.

Paramètre	Effet principal	Prise en compte dans ModuGarde
Température	Confort thermique, croissance, stress chaud/froid	Mesure par DS18B20 et commande chauffage/ ventilation
Ventilation	Renouvellement d'air, évacuation chaleur et humidité	Commande par niveaux de relais
Qualité de l'air	Gaz, odeurs, poussières, confort respiratoire	Gérée indirectement par ventilation ; capteurs gaz en perspective
Éclairage	Activité, photopériode, conduite chair ou ponte	Programmation horaire via module Poultry

2.2.2 Température optimale des volailles

La température optimale dépend fortement de l'âge des volailles. Les poussins nouvellement installés ne possèdent pas encore une thermorégulation efficace ; ils nécessitent donc une ambiance chaude et stable. Avec l'âge, leur capacité d'adaptation augmente et la consigne de température diminue progressivement [17].

Dans les élevages de chair, la consigne thermique est généralement élevée au démarrage, puis réduite étape par étape jusqu'à la phase de finition. Dans les élevages de ponte, la conduite est plus longue et recherche une stabilité adaptée à la production. Le système doit donc accepter des profils différents [18].

Le module Poultry de ModuGarde utilise cette logique. L'utilisateur sélectionne une famille et un profil. Le système calcule le jour du lot, détermine la température cible et applique les niveaux de ventilation ou de chauffage en fonction de l'écart mesuré.

L'intérêt d'une consigne journalière est de réduire les réglages manuels répétitifs. L'éleveur ne doit pas modifier la température chaque jour dans le code. Il peut utiliser l'interface pour définir le profil, vérifier la cible et ajuster les paramètres si les conditions locales l'exigent.

La mesure multipoints améliore également la décision. Dans un hangar, une seule sonde peut ne pas représenter l'ensemble du bâtiment. Trois sondes permettent de surveiller plusieurs zones et d'identifier un problème local de ventilation, de chauffage ou de position de capteur.

La sécurité impose enfin de détecter les valeurs incohérentes. Une sonde débranchée ou une lecture invalide ne doit pas déclencher une commande dangereuse. Le système doit signaler le défaut et libérer les relais concernés.

Le système doit également éviter les réactions brutales. Si une consigne est dépassée de manière légère, il n'est pas nécessaire d'activer immédiatement tous les ventilateurs. Une commande progressive permet de préserver le confort des animaux et de limiter la consommation électrique.

La température optimale doit être présentée comme une plage de travail et non comme une valeur unique rigide. L'éleveur peut ajuster la consigne selon la saison, la race, la densité, l'isolation du bâtiment et l'observation du comportement du lot.

Dans le firmware, les seuils associés aux niveaux de ventilation sont définis par rapport à la température cible. Cette méthode rend la logique adaptable : lorsque la cible change avec l'âge, les seuils de ventilation suivent automatiquement la nouvelle référence.

La température doit être mesurée à hauteur représentative des animaux et non uniquement près du plafond ou d'une source de chaleur. Ce point devient important dans la réalisation expérimentale, car un mauvais emplacement de sonde peut produire une commande erronée même si le programme fonctionne correctement.

Le fait d'utiliser une consigne évolutive rend le système plus proche de la pratique avicole. L'éleveur ne travaille pas avec une seule valeur pour tout le cycle ; il adapte progressivement l'ambiance à l'âge du lot. ModuGarde formalise cette évolution dans son module avicole.

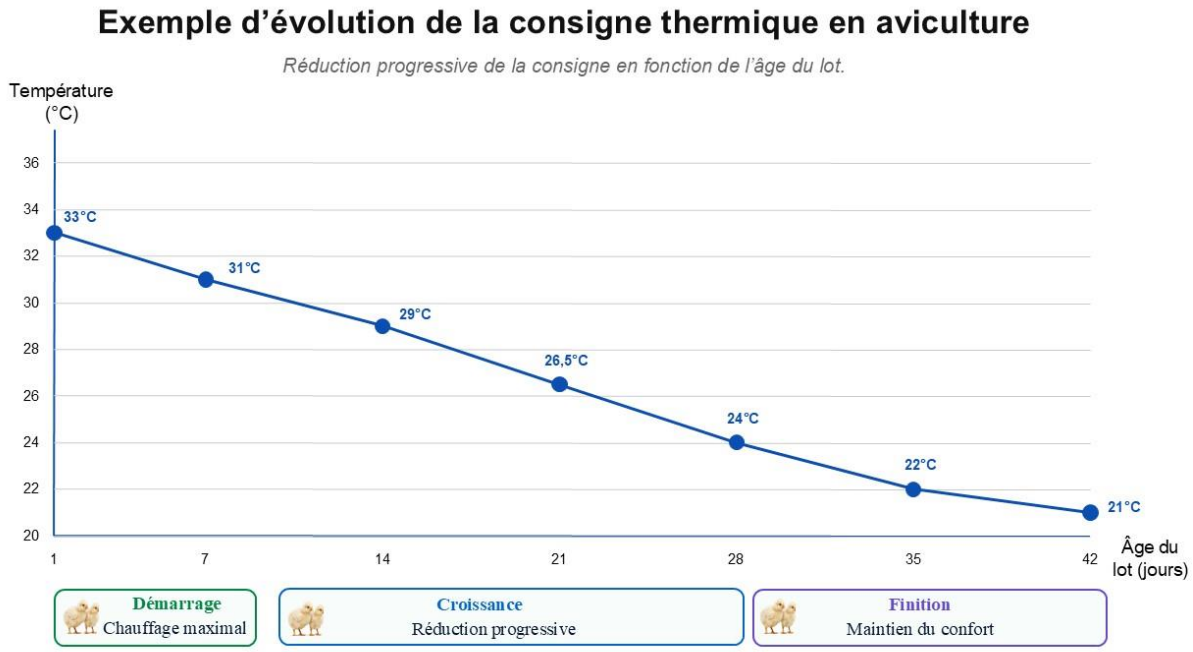


Figure 2-2 Exemple d'évolution de la consigne thermique en aviculture.

Tableau 2.2 Températures de référence simplifiée selon l'âge.

Âge indicatif	Tendance de consigne	Conséquence de commande
Démarrage	Température élevée et stable	Chauffage disponible, ventilation douce
Croissance	Diminution progressive	Ventilation étagée selon l'écart à la cible
Finition	Température plus basse	Ventilation plus active, surveillance stress chaud
Ponte	Stabilité sur longue durée	Éclairage et ventilation réguliers

2.2.3 Ventilation et qualité de l'air

La ventilation est l'un des éléments les plus importants dans un bâtiment avicole. Elle permet d'évacuer la chaleur excessive, de renouveler l'air et de réduire les gaz indésirables. Elle influence donc à la fois le confort thermique et la qualité sanitaire de l'ambiance [19].

Une ventilation insuffisante peut provoquer une accumulation de chaleur et de gaz. Une ventilation excessive peut refroidir les animaux, surtout pendant les premiers jours d'élevage. La commande doit donc être progressive, stable et adaptée à l'âge du lot.

ModuGarde adopte une ventilation étagée. Trois niveaux de ventilation peuvent être configurés. Le premier niveau répond à un faible écart au-dessus de la consigne. Les niveaux

suivants interviennent lorsque l'écart augmente. Cette logique évite d'activer tous les ventilateurs simultanément.

L'hystérésis joue un rôle essentiel. Le seuil d'arrêt doit être différent du seuil de démarrage. Sans hystérésis, un ventilateur pourrait démarrer à 28,0 °C et s'arrêter à 27,9 °C, puis redémarrer immédiatement. Ce comportement userait les relais et rendrait la régulation instable.

La qualité de l'air n'est pas seulement liée à la température. Elle dépend également de l'humidité, de l'ammoniac, du dioxyde de carbone, de la poussière et de la vitesse d'air. Même si ModuGarde ne mesure pas directement tous ces paramètres, la ventilation constitue le moyen d'action principal pour les améliorer.

Dans une version industrielle, il serait possible d'ajouter des capteurs de gaz et de poussières. Le firmware pourrait alors combiner les mesures thermiques et les mesures de qualité d'air pour décider d'un niveau de ventilation minimal ou d'une alerte spécifique.

La qualité de l'air est souvent moins visible que la température, mais elle est tout aussi importante. L'éleveur peut parfois détecter une mauvaise ambiance par l'odeur, la poussière ou le comportement des animaux. Un système automatique peut aider à rendre cette surveillance plus régulière.

La ventilation étagée utilisée dans ModuGarde permet d'appliquer une réponse graduelle. Le premier niveau peut être assimilé à une ventilation de correction, le second à une ventilation de renforcement et le troisième à une ventilation de situation critique.

Cette organisation rend le fonctionnement plus explicable. Sur l'interface, l'utilisateur peut comprendre qu'un niveau de ventilation correspond à un écart précis à la consigne, au lieu de voir un relais s'activer sans contexte.

La ventilation doit être pensée comme un compromis entre renouvellement d'air et conservation de la chaleur. Pendant les premières phases, l'excès de ventilation peut nuire au confort. Pendant les phases avancées, l'insuffisance de ventilation peut créer une ambiance chaude et chargée.

La qualité de l'air peut être améliorée par une ventilation minimale indépendante du seuil thermique. Cette fonction n'est pas totalement développée dans le prototype, mais elle constitue une évolution logique si des capteurs de gaz ou d'humidité sont ajoutés.

2.2.4 Éclairage avicole

L'éclairage influence le comportement, l'activité, la croissance et le rythme biologique des volailles. Dans les bâtiments de ponte, la photopériode occupe une place importante dans la conduite de production. Dans les élevages de chair, la lumière participe au démarrage, à l'activité et à la gestion du repos [20].

Une commande manuelle de l'éclairage peut être suffisante dans un petit bâtiment, mais elle devient moins régulière lorsque l'utilisateur doit intervenir chaque jour. Un programme horaire permet d'obtenir une photopériode plus stable et plus facile à vérifier.

ModuGarde peut associer un relais à l'éclairage et utiliser l'horloge DS3231 pour conserver l'heure. L'utilisateur configure les horaires via la WebView. Le système applique ensuite la logique automatiquement, même après redémarrage, si l'heure est conservée par le RTC [21].

La programmation de la lumière doit rester flexible. Les recommandations diffèrent selon le type d'élevage, la souche, l'âge et les objectifs de production. Pour cette raison, le système propose un cadre configurable plutôt qu'une seule règle imposée.

La lumière doit être contrôlée avec régularité. Une variation non maîtrisée des horaires peut perturber le rythme des animaux et rendre la conduite moins stable. Le recours au RTC permet de préserver cette régularité même après une coupure courte.

Le relais d'éclairage doit être traité comme un actionneur à part entière. Il n'est pas seulement une sortie auxiliaire : il fait partie du programme avicole et peut être lié au jour d'élevage dans le module Poultry.

L'interface WebView facilite la compréhension de cette fonction. L'utilisateur visualise les horaires et peut les modifier sans reprogrammer la carte, ce qui rend le système plus accessible sur le terrain.

Le programme lumineux doit être suffisamment simple pour être compris par l'utilisateur. L'objectif n'est pas de multiplier les options inutiles, mais de fournir un réglage fiable des heures d'allumage et d'extinction, avec une sauvegarde persistante.

En cas de coupure électrique, le retour de l'éclairage doit rester cohérent avec l'heure réelle et non avec l'ancien état mémorisé. Cette exigence rejoint le principe général de ModuGarde : restaurer les règles, mais relire la situation réelle avant d'agir.

2.3 Méthodologie de conception du système ModuGarde

La méthodologie de conception consiste à transformer un besoin réel en architecture fonctionnelle. Le point de départ n'est pas le choix du microcontrôleur, mais la compréhension de ce que l'utilisateur doit surveiller, commander et recevoir comme information.

Dans ModuGarde, la conception a été organisée en quatre étapes : analyse des besoins, définition du cahier des charges, choix techniques et validation expérimentale. Cette démarche permet de justifier chaque composant et chaque module logiciel.

La méthode retenue sépare également la mesure, le traitement, l'action et la supervision. Cette séparation rend le système plus compréhensible et facilite la correction des défauts. Si une alarme apparaît, il est possible de savoir si le problème vient de la mesure, de la logique, du relais ou de la communication.

Cette approche méthodologique est proche de celle utilisée dans le mémoire de référence, où le système étudié est présenté en partant du contexte et de la problématique avant d'arriver à la réalisation expérimentale.

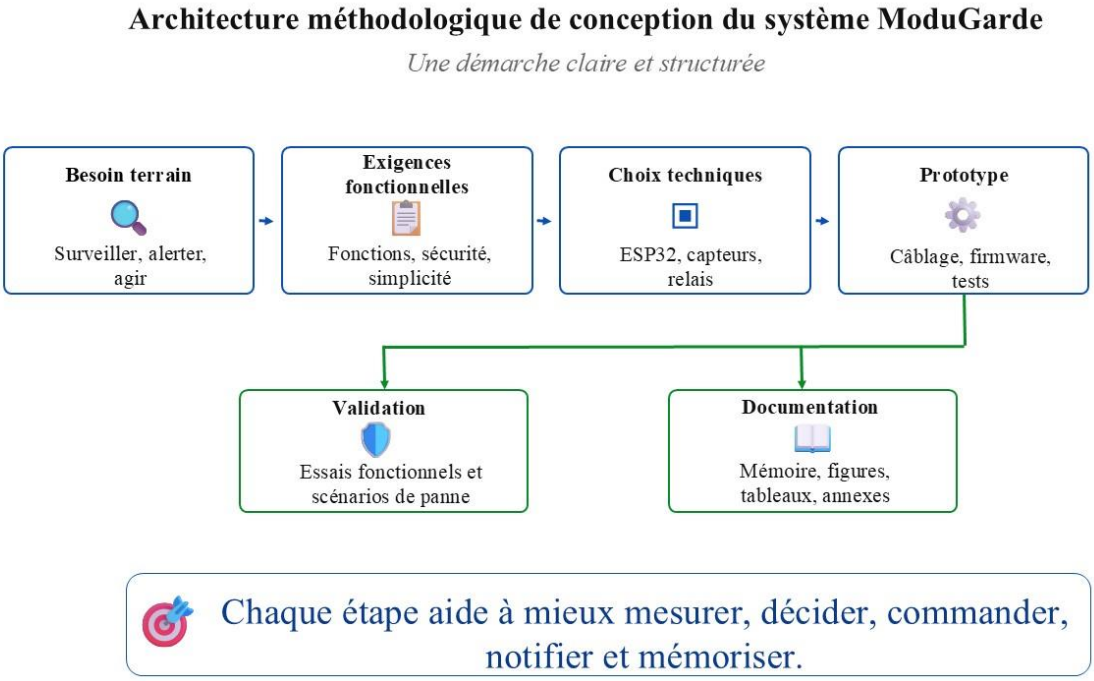


Figure 2-3 Architecture méthodologique de conception du système ModuGarde.

2.3.1 Analyse des besoins

L'analyse des besoins a montré que l'utilisateur souhaite réduire les interventions manuelles répétitives. Dans un hangar, il doit normalement vérifier la température, l'état des ventilateurs, l'éclairage, les alarmes, les contacts mécaniques et la présence de l'alimentation. ModuGarde transforme ces observations en fonctions automatiques.

Le besoin de sécurité est également central. Une coupure secteur, une température hors seuil ou un défaut de sonde peut avoir des conséquences importantes. Le système doit donc détecter ces situations, agir localement et prévenir l'utilisateur à distance.

Le besoin d'accessibilité impose une interface simple. L'utilisateur ne doit pas modifier le code pour changer un seuil ou un numéro de téléphone. La WebView locale permet d'effectuer ces réglages à partir d'un navigateur.

Le besoin de robustesse impose une sauvegarde persistante. Les réglages doivent rester disponibles après reset ou coupure. Cette exigence est plus sévère qu'une simple démonstration de quelques minutes en laboratoire.

Enfin, le besoin de modularité impose une architecture évolutive. Le système doit pouvoir accepter de nouveaux capteurs ou de nouvelles règles sans être entièrement reconstruit.

L'analyse des besoins a aussi pris en compte la maintenance. Un système agricole doit être diagnostiqué rapidement. L'utilisateur doit savoir quelle sonde est en défaut, quel relais est actif et quelle règle a déclenché l'action.

Le besoin de simplicité ne signifie pas que le système doit être pauvre en fonctions. Il signifie que les fonctions doivent être organisées de façon claire. C'est pourquoi la WebView est structurée par pages plutôt que par un seul écran chargé.

Le besoin de réaction rapide justifie l'utilisation de plusieurs canaux : LED et sirène pour le local, WebView pour la consultation proche, SMS et appel pour l'utilisateur éloigné.

Le besoin terrain a également montré l'importance d'une solution compréhensible. Un dispositif trop complexe peut être abandonné même s'il est techniquement performant. Le prototype doit donc présenter ses fonctions avec des mots simples et des états visibles.

L'analyse des besoins conduit à hiérarchiser les fonctions. La sécurité et les alarmes sont prioritaires, puis viennent la régulation et le confort d'utilisation. Cette hiérarchie influence la gestion des relais et des notifications.

- Mesurer automatiquement l'ambiance ;
- Commander les équipements par relais ;
- Notifier à distance par GSM ;
- Conserver les paramètres ;
- Réduire les fausses alarmes ;
- Permettre une utilisation locale simple.

2.3.2 Cahier des charges fonctionnel

Le cahier des charges fonctionnel regroupe les fonctions attendues du système sans entrer immédiatement dans les détails de câblage. Il sert de lien entre le besoin de terrain et la réalisation technique.

La première fonction est la mesure thermique. Le système doit lire plusieurs sondes, détecter les valeurs invalides et fournir à l'utilisateur des informations exploitables. La deuxième fonction est la commande des sorties. Les relais doivent être activés selon des règles configurées et protégés contre les commutations excessives.

La troisième fonction est la notification. En cas d'anomalie, le système doit pouvoir envoyer un SMS ou déclencher un appel. La quatrième fonction est la supervision locale, réalisée par WebView. La cinquième fonction est la persistance, qui permet de retrouver les réglages après redémarrage.

Le cahier des charges impose aussi des contraintes de sécurité : confirmation temporelle des alarmes, hystérésis, séparation du relais sirène, gestion des défauts de sonde et lecture des états physiques au démarrage.

Le cahier des charges doit également préciser les limites du prototype. Une fonction non câblée ne doit pas être présentée comme validée. Cette rigueur est importante pour éviter les contradictions entre le mémoire, le code et la maquette.

Chaque exigence doit pouvoir être vérifiée par un essai. Par exemple, l'exigence de persistance se vérifie par une coupure complète ; l'exigence de notification se vérifie par un déclenchement d'alarme ; l'exigence de stabilité se vérifie autour d'un seuil.

Cette logique de vérification prépare le chapitre 3. Les essais expérimentaux ne sont pas ajoutés à la fin du projet : ils découlent directement du cahier des charges fonctionnel établi au chapitre 2.

Le cahier des charges sert aussi à limiter le périmètre du projet. Il définit ce qui doit être réalisé dans la version expérimentale et ce qui reste en perspective. Cette limite évite de disperser le travail sur des fonctions non testées.

Tableau 2.3 Cahier des charges fonctionnel du système ModuGarde.

Fonction	Exigence	Justification
Mesure thermique	Lire plusieurs sondes numériques	Représenter différentes zones du hangar
Ventilation	Commander jusqu'à trois niveaux	Réponse graduelle à la chaleur
Chauffage	Activer une sortie si température basse	Protection des jeunes animaux
Éclairage	Appliquer des horaires	Régularité de la photopériode
Alarme	Sirène, LED, SMS ou appel	Alerter localement et à distance
Supervision	WebView locale	Réglage sans Internet ni logiciel spécialisé
Mémoire	Sauvegarde persistante	Conserver les paramètres après coupure
Sécurité	Hystérésis et confirmation	Réduire les fausses alarmes

2.3.3 Architecture méthodologique

L'architecture méthodologique de ModuGarde peut être divisée en quatre niveaux. Le premier niveau est l'acquisition, où les capteurs et entrées physiques collectent l'information. Le deuxième niveau est le traitement, où le firmware analyse les données et applique les seuils.

Le troisième niveau est l'action. Les relais commandent les équipements : ventilateurs, chauffage, éclairage, sirène ou sorties auxiliaires. Le quatrième niveau est la supervision. L'utilisateur consulte les états, modifie les paramètres et reçoit les alertes.

Cette organisation facilite l'explication devant le jury. Chaque bloc peut être présenté séparément, puis relié au fonctionnement global. Elle permet aussi de localiser une panne ou une erreur de configuration.

Le principe général peut être résumé par la chaîne : mesurer, vérifier, décider, agir, informer et mémoriser. Cette chaîne est utilisée dans toutes les fonctions importantes du système.

L'architecture méthodologique sert de guide pour le développement. Elle évite de commencer par l'interface ou les relais sans avoir défini la logique générale. Elle permet aussi de contrôler la cohérence entre le schéma, le code et le mémoire.

Dans la rédaction, cette architecture permet de répartir les informations entre les chapitres. L'état de l'art explique les principes, le chapitre 2 justifie les choix, et le chapitre 3 montre la réalisation. Cette séparation limite les répétitions.

2.4 Choix techniques du système ModuGarde

Les choix techniques ont été réalisés en tenant compte de plusieurs critères : disponibilité des composants, coût, simplicité de mise en œuvre, compatibilité avec l'environnement Arduino, possibilité de démonstration et capacité à évoluer vers une version plus robuste.

Le prototype doit rester compréhensible par un jury. Les composants retenus sont donc connus, identifiables et liés à des fonctions précises. L'objectif n'est pas de cacher la complexité, mais de l'organiser de manière lisible.

La cohérence du choix technique est plus importante que la multiplication des composants. Ajouter un capteur ou un module sans l'intégrer dans la logique de décision n'améliore pas le système. Chaque élément doit avoir un rôle clair.

Les choix retenus sont présentés dans les sous-sections suivantes : microcontrôleur, capteurs, actionneurs et communication.

Tableau 2.4 Choix techniques retenus pour le prototype.

Élément	Choix retenu	Raison principale
Microcontrôleur	ESP32-S3	Nombre de GPIO, Wi-Fi intégré, puissance et coût
Température	DS18B20	Mesure numérique et détection de défauts
Temps réel	DS3231	Maintien de l'heure pour éclairage et historique
Communication distante	SIM800L	SMS, appels et USSD sans Internet
Sorties	Relais	Commande simple des charges externes
Supervision	WebView locale	Accès par navigateur, sans application dédiée

2.4.1 Choix du microcontrôleur

Le microcontrôleur retenu est l'ESP32-S3. Ce choix répond au besoin d'un système capable de gérer plusieurs entrées et sorties tout en hébergeant une interface WebView locale. Le Wi-Fi intégré constitue un avantage important pour la supervision sans routeur.

L'ESP32-S3 offre également une puissance suffisante pour exécuter plusieurs tâches : lecture des sondes, traitement des seuils, serveur web, gestion GSM, écriture en mémoire et pilotage des relais. Le système peut ainsi rester compact tout en assurant plusieurs fonctions.

La compatibilité avec l'environnement Arduino facilite le développement et la présentation pédagogique. Les bibliothèques disponibles permettent de gérer les capteurs, le Wi-Fi, le serveur HTTP, l'I2C et le bus 1-Wire.

Le choix des broches reste critique. Certaines broches de l'ESP32-S3 sont sensibles au démarrage, à l'USB ou à la mémoire. La cartographie retenue évite autant que possible les broches problématiques et documente clairement les affectations.

Le nombre de GPIO disponibles a été un critère déterminant. Le système doit gérer huit relais, trois sondes, quatre fins de course, une entrée secteur, une LED, un bouton, le bus I2C et la liaison série du GSM. Une carte trop limitée aurait imposé des extensions supplémentaires.

Le Wi-Fi intégré de l'ESP32-S3 évite l'ajout d'un module externe. Cela réduit le câblage, le coût et les risques de panne. Cette caractéristique explique le choix d'une interface WebView locale plutôt qu'un afficheur uniquement matériel.

La puissance de calcul de la carte permet également de gérer les pages web et les traitements sans interrompre les fonctions de commande. Cela reste conditionné par une programmation non bloquante et une bonne organisation logicielle.

Le choix de l'ESP32-S3 est aussi lié à la possibilité d'intégrer plusieurs services dans un seul composant. Le même microcontrôleur gère le serveur web, les entrées, les sorties et la logique utilisateur. Cela simplifie l'architecture générale du prototype.

Cette intégration exige cependant une programmation rigoureuse. Une fonction mal écrite peut bloquer l'ensemble. C'est pourquoi le firmware doit éviter les attentes longues et préférer des traitements périodiques courts.

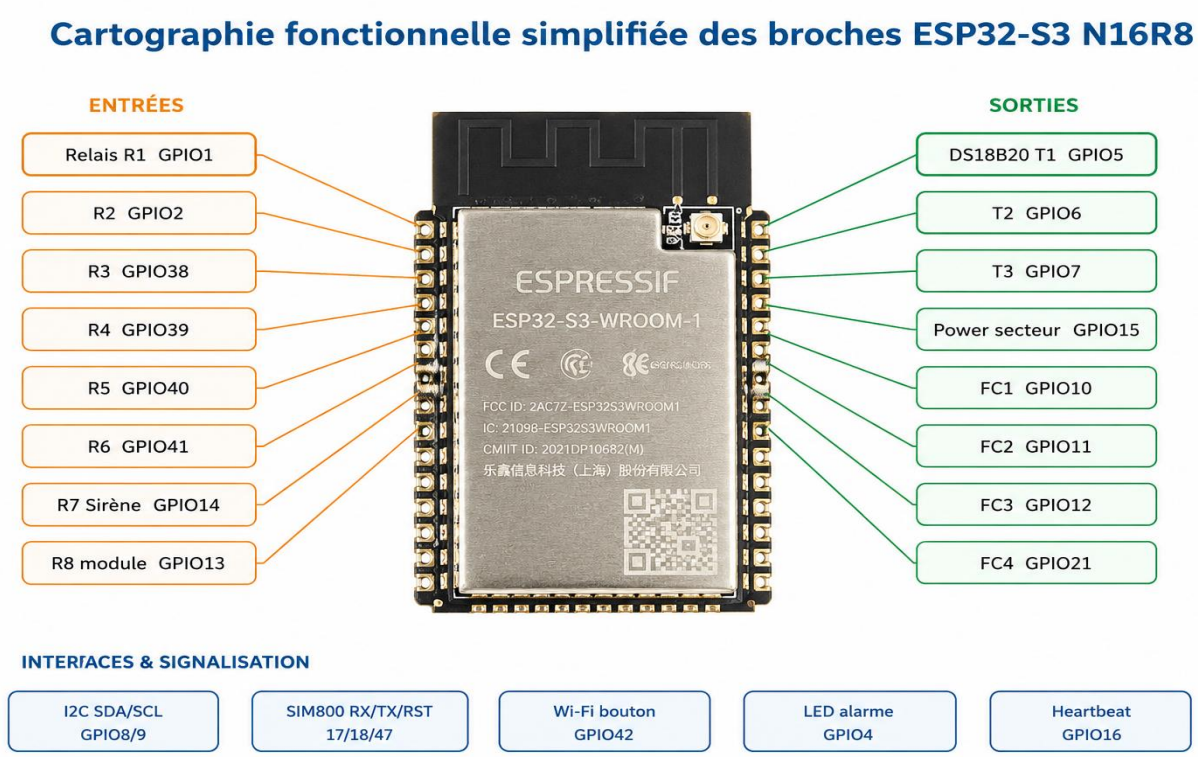


Figure 2-4 Cartographie fonctionnelle simplifiée des broches ESP32-S3.

2.4.2 Choix des capteurs

Le capteur principal de ModuGarde est la sonde numérique DS18B20. Elle est utilisée pour mesurer la température en plusieurs points du bâtiment. Son interface 1-Wire facilite le câblage et sa sortie numérique simplifie le traitement par le microcontrôleur.

Trois sondes permettent de surveiller différentes zones. Cette approche est plus fiable qu'une mesure unique lorsque la chaleur n'est pas répartie uniformément. Elle permet aussi de diagnostiquer une zone chaude, une zone froide ou un capteur défectueux.

Le système utilise également des entrées de fins de course. Elles représentent des états mécaniques : porte, volet, contact de sécurité ou position de machine. Chaque entrée peut être associée à une action ou une alarme selon la configuration.

L'entrée de coupure secteur constitue une autre information importante. Elle permet de détecter la perte d'alimentation principale et de prévenir l'utilisateur. Le RTC DS3231 complète l'architecture en conservant l'heure, nécessaire pour l'éclairage et l'historique.

Les capteurs absents ou invalides doivent être traités avec prudence. Une valeur incorrecte ne doit pas commander un relais. Le firmware doit donc distinguer une alarme climatique d'un défaut de capteur.

Le choix de plusieurs sondes permet aussi de gérer des modes de secours. Si une sonde est absente, le système peut signaler le défaut et, selon le module, rechercher une sonde valide ou désactiver l'action dangereuse.

Les fins de course offrent une polyvalence intéressante. Ils peuvent représenter un volet d'aération, une porte, un capot, une trappe ou un contact de sécurité. Leur fonction exacte est définie par l'utilisateur dans l'interface.

Le RTC DS3231 n'est pas un simple ajout. Il permet de conserver une notion de temps cohérente pour l'historique et l'éclairage. Sans heure fiable, l'analyse des événements après coupure devient moins précise.

Les capteurs doivent être faciles à remplacer. Sur le terrain, une sonde peut être endommagée par l'humidité, la poussière ou un choc. Une identification claire des sondes T1, T2 et T3 facilite le diagnostic.

La notion de défaut capteur est aussi importante que la mesure elle-même. Un système fiable ne doit pas seulement afficher une valeur ; il doit être capable de reconnaître quand cette valeur n'est plus crédible.

2.4.3 Choix des actionneurs

Les actionneurs retenus sont principalement des relais. Ils permettent de commander des équipements électriques extérieurs au microcontrôleur : ventilateurs, lampes, chauffage, sirène ou contacteurs. Cette solution est facile à expliquer et à tester.

Le prototype dispose de huit sorties relais. Les relais 1 à 6 sont configurables pour les fonctions usuelles. Le relais 7 est réservé à la sirène. Le relais 8 peut servir de sortie industrielle supplémentaire, par exemple pour un module température ou alimentation.

La réservation du relais sirène améliore la lisibilité et la sécurité. Même si plusieurs modules déclenchent une alarme, la sortie sonore reste centralisée. Les autres relais peuvent être associés à des fonctions métier comme ventilation ou chauffage.

La commande des relais doit être protégée par des règles. Il faut éviter qu'un relais réservé par une fonction automatique soit commandé manuellement en contradiction avec la logique de sécurité. C'est pourquoi le firmware intègre des priorités et des réservations.

Les relais doivent être dimensionnés selon les charges réelles. Dans la maquette, ils peuvent piloter des voyants ou petits équipements. Sur le terrain, ils doivent souvent commander des contacteurs adaptés aux moteurs ou charges de puissance.

La logique de réservation des relais a une importance pratique. Elle évite qu'un relais attribué à la ventilation soit commandé par une autre fonction sans cohérence, ce qui pourrait produire un comportement dangereux ou incompréhensible.

Les actionneurs doivent être choisis en fonction des charges réelles. Dans le mémoire, il faut distinguer la sortie logique du prototype et l'équipement final commandé. Le relais peut piloter un voyant pendant la démonstration et un contacteur dans une installation réelle.

La présence de plusieurs relais permet de représenter plusieurs fonctions : ventilation, chauffage, éclairage, sirène ou sortie auxiliaire. Cette modularité est un avantage important du système.

2.4.4 Choix du système de communication

Le système de communication de ModuGarde combine deux moyens complémentaires. Le premier est le Wi-Fi local, utilisé pour l'interface WebView. Le second est le GSM, utilisé pour les alertes à distance par SMS ou appel.

Le Wi-Fi local est adapté à la configuration et au diagnostic sur place. L'utilisateur se connecte au point d'accès du système et ouvre l'adresse locale dans un navigateur. Il peut alors consulter les états, modifier les paramètres et sauvegarder la configuration.

Le GSM est adapté à l'alerte à distance. Dans les zones agricoles, une connexion Internet n'est pas toujours disponible, tandis que le réseau mobile peut suffire pour transmettre une alarme. Les SMS offrent une trace écrite et les appels attirent l'attention.

L'association des deux communications rend le système plus robuste. La WebView ne dépend pas du réseau mobile, et le GSM ne dépend pas d'un routeur Wi-Fi externe. Chaque canal répond à une situation d'usage différente.

Le choix du GSM est cohérent avec les zones agricoles isolées. L'utilisateur n'a pas toujours accès à une connexion Internet stable dans le hangar, mais il peut recevoir un appel ou un SMS lorsque le réseau mobile est disponible.

La WebView et le GSM ne remplissent pas la même fonction. La WebView est un outil de réglage et de supervision locale. Le GSM est un outil d'alerte à distance. Les combiner améliore l'utilité du système.

La communication doit rester secondaire par rapport à la sécurité physique. Même si le GSM échoue, les relais doivent revenir à l'état normal lorsque la condition d'alarme disparaît. Cette règle protège le système contre les dépendances inutiles.

La communication locale et la communication distante doivent être complémentaires. Lorsque l'utilisateur est devant le boîtier, la WebView est plus complète. Lorsqu'il est absent, le GSM devient plus utile car il attire son attention.

La conception doit aussi prévoir les cas d'échec de communication. Un réseau mobile faible ou une carte SIM sans crédit ne doit pas empêcher le système de continuer à commander localement les relais.

2.5 Architecture matérielle du système

L'architecture matérielle de ModuGarde repose sur un ESP32-S3 relié aux capteurs, aux relais, au module GSM, à l'horloge temps réel et aux éléments de signalisation. Chaque bloc matériel correspond à une fonction précise.

Les sondes DS18B20 sont raccordées aux entrées numériques prévues. Les fins de course utilisent des entrées avec résistance de rappel interne. L'entrée secteur permet de détecter une coupure. Le module DS3231 communique par bus I2C. Le SIM800L communique par liaison série.

Les huit relais constituent l'interface de puissance. Le microcontrôleur ne commande pas directement les charges importantes ; il pilote des relais ou modules de relais. Cette séparation est indispensable pour protéger l'électronique faible tension.

L'alimentation matérielle doit être soigneusement dimensionnée. Le SIM800L peut consommer des pics de courant pendant les transmissions. Les relais et les charges peuvent créer des parasites. Une bonne masse commune, des condensateurs et des protections sont nécessaires pour un usage réel [22].

Le boîtier doit également protéger le prototype contre la poussière, l'humidité et les contacts accidentels. Pour une version industrielle, il faudrait ajouter des connecteurs normalisés, des fusibles, des protections contre surtensions et une séparation claire entre basse tension et puissance [23].

Dans une version de terrain, le boîtier doit intégrer un repérage clair des entrées, des sorties et des alimentations. Cette organisation permet à un technicien de diagnostiquer rapidement un défaut sans consulter le code source.

La disposition matérielle doit permettre une maintenance progressive. Un technicien doit pouvoir isoler une sonde, un relais ou un module sans démonter toute l'installation. Cette exigence influence le choix des borniers et le repérage des câbles.

La qualité du câblage influence directement la fiabilité. Des fils trop longs, une masse instable ou une alimentation insuffisante peuvent provoquer des défauts qui ressemblent à des erreurs logicielles. Le mémoire doit donc rappeler que le logiciel ne corrige pas tous les défauts matériels.

Tableau 2.5 Cartographie finale des broches utilisées.

Groupe	Élément	Broche ou fonction
Relais	R1 à R6	GPIO1, GPIO2, GPIO38, GPIO39, GPIO40, GPIO41
Relais	R7 sirène	GPIO14
Relais	R8 sortie module	GPIO13
Température	DS18B20 T1, T2, T3	GPIO5, GPIO6, GPIO7
RTC	DS3231	SDA GPIO8, SCL GPIO9
Entrées	FC1 à FC4	GPIO10, GPIO11, GPIO12, GPIO21
Secteur	Détection coupure	GPIO15
GSM	SIM800L	RX GPIO17, TX GPIO18, RST GPIO47
Signalisation	LED alarme et heartbeat	GPIO4, GPIO16
Commande	Bouton Wi-Fi	GPIO42

2.6 Architecture logicielle

L'architecture logicielle de ModuGarde est organisée autour d'une boucle principale non bloquante. Le firmware doit lire les capteurs, servir l'interface Web, gérer les alertes GSM, commander les relais et mettre à jour l'historique sans immobiliser le système.

Le programme est divisé en modules fonctionnels. Chaque module possède sa logique propre, mais tous partagent des services communs : configuration, notifications, historique, horloge, relais et sécurité. Cette séparation rend le code plus maintenable.

Le module température traite les seuils et les défauts de sonde. Le module alimentation traite la coupure secteur et le retour normal. Le module fin de course traite les contacts physiques. Le module Poultry coordonne température cible, ventilation, chauffage et lumière.

La WebView n'est pas seulement une page d'affichage. Elle permet de modifier les paramètres, de lancer des tests, de visualiser les états et de vérifier l'historique. Le firmware doit donc synchroniser correctement l'interface avec la réalité physique.

Le découpage logiciel permet d'éviter la répétition des règles dans plusieurs parties du code. Une fonction commune de notification, de confirmation ou de retour normal réduit les erreurs et améliore la cohérence du système.

L'architecture logicielle doit aussi gérer la concurrence logique. Par exemple, une page Web peut demander l'état du système pendant que le GSM traite une alerte et que les sondes sont lues. Le programme doit répondre sans bloquer.

La logique de persistance est intégrée à cette architecture. Une configuration sauvegardée doit être vérifiée, restaurée et appliquée uniquement si elle reste compatible avec l'état physique réel.

La modularité logicielle facilite l'évolution. Si un capteur d'humidité est ajouté plus tard, il peut devenir un nouveau module ou enrichir le module ventilation. L'architecture actuelle prépare cette évolution.

La gestion de la mémoire est un sous-système à part entière. Elle doit éviter les écritures inutiles, protéger les paramètres critiques et empêcher que l'historique ne dégrade les réglages essentiels.

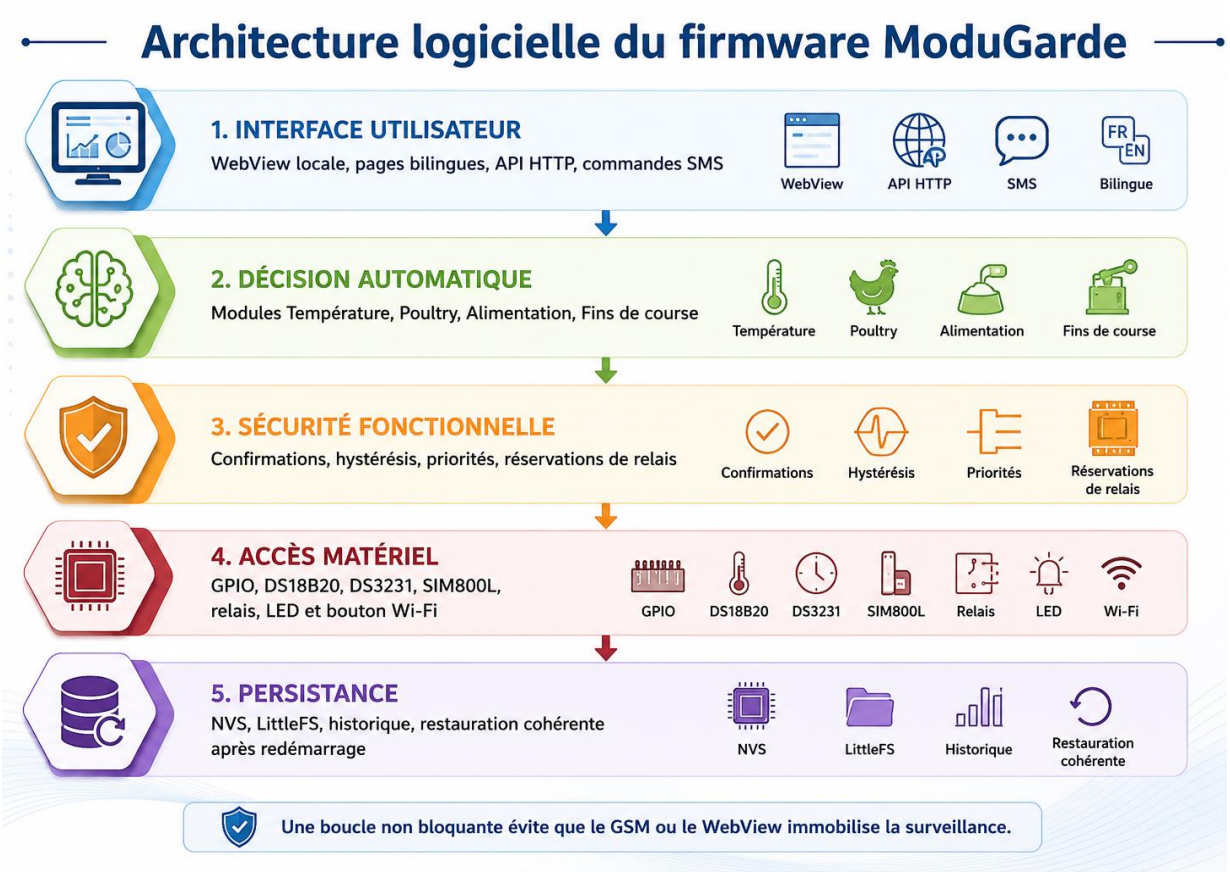


Figure 2-5 Architecture logicielle du firmware ModuGarde.

2.6.1 Acquisition des données

L'acquisition des données consiste à lire périodiquement les entrées physiques du système. Les sondes de température fournissent les valeurs thermiques, l'entrée secteur indique la présence ou l'absence de tension principale et les fins de course indiquent les états mécaniques.

La lecture ne doit pas être considérée immédiatement comme vraie. Une valeur instable, un rebond de contact ou une sonde invalide peut provoquer une mauvaise décision. Le firmware applique donc des confirmations temporelles et des contrôles de validité.

Pour les sondes DS18B20, certaines valeurs sont connues comme suspectes, par exemple 85 °C au démarrage ou -127 °C en cas de sonde absente. Le système doit reconnaître ces valeurs et signaler un défaut au lieu de commander un ventilateur ou un chauffage sur une fausse mesure.

L'acquisition doit rester non bloquante. Si la lecture d'un capteur prend du temps ou échoue, les autres fonctions doivent continuer : relais, WebView, GSM et watchdog. Cette exigence est importante pour un fonctionnement 24h/24.

L'acquisition est réalisée de manière périodique. Il n'est pas nécessaire de lire toutes les entrées à chaque microseconde ; il faut plutôt respecter une période cohérente avec la dynamique du système. La température évolue lentement par rapport aux signaux électriques.

Les fins de course peuvent changer rapidement, mais elles peuvent aussi rebondir mécaniquement. Le filtrage temporel transforme un contact instable en état logique fiable.

La qualité de l'acquisition conditionne toute la suite. Une mauvaise mesure entraîne une mauvaise décision, même si l'algorithme de commande est bien écrit.

Le rythme d'acquisition doit respecter la nature du phénomène observé. Une température ne change pas aussi vite qu'un contact électrique. Adapter les périodes de lecture évite de surcharger le microcontrôleur.

La mesure multipoints permet aussi de comparer les zones. Si une sonde indique une valeur très différente des autres, l'utilisateur peut suspecter une mauvaise circulation d'air ou un capteur mal placé.

2.6.2 Traitement des données

Le traitement transforme les mesures en décisions. Il compare la température aux consignes, vérifie les seuils minimum et maximum, applique l'hystérésis et prend en compte les temporisations. Ce traitement évite qu'une variation momentanée déclenche une action inutile.

La logique de priorité est également traitée à ce niveau. Si plusieurs modules demandent un relais, le firmware doit déterminer quelle fonction est autorisée à l'utiliser. Les relais réservés par le module Poultry ou par une alarme ne doivent pas être modifiés de manière incohérente.

Le retour normal fait partie du traitement. Une alarme ne doit pas rester active indéfiniment lorsque la condition disparaît. Le système doit confirmer le retour, libérer les relais concernés et, si nécessaire, informer l'utilisateur que la situation est redevenue normale.

Cette étape est la différence entre un simple montage électronique et un système intelligent. La mesure seule n'est pas suffisante ; c'est la règle de décision qui donne du sens au prototype.

Le traitement doit tenir compte de la validité de la donnée. Une mesure absente, figée ou impossible doit être classée comme défaut et non comme température réelle. Cette distinction protège les actionneurs.

Les seuils configurés doivent être stockés de façon persistante. L'utilisateur peut ainsi adapter la régulation à son bâtiment sans reprogrammer la carte après chaque redémarrage.

La priorité des alarmes est aussi traitée à ce niveau. Une coupure secteur ou un défaut de sonde peut être plus critique qu'une simple commande manuelle de relais.

Le traitement des données doit fournir une décision stable. Une seule lecture anormale ne suffit pas ; il faut une condition confirmée. Cette règle améliore la confiance de l'utilisateur dans les alarmes.

Le traitement doit aussi gérer les priorités. Une alarme critique doit être traitée avant une action de confort. Cette hiérarchie renforce la sécurité fonctionnelle du système.

2.6.3 Contrôle automatique

Le contrôle automatique agit sur les relais selon les décisions prises par le traitement. Si la température dépasse un seuil, un niveau de ventilation peut être activé. Si elle descend sous une limite basse, le chauffage peut être commandé. Si une coupure secteur est confirmée, la sirène et les notifications peuvent être déclenchées.

La ventilation étagée est un exemple de contrôle progressif. Chaque niveau possède ses propres seuils d'activation et de retour. Cela permet d'adapter la puissance de ventilation à la gravité de l'écart thermique.

Le chauffage doit être coordonné avec la ventilation. Il serait incohérent d'activer simultanément une forte ventilation et un chauffage pour la même zone sans logique de priorité. Le module Poultry doit donc organiser ces actions selon la consigne et l'état réel.

Le contrôle automatique doit aussi rester explicable. L'utilisateur doit pouvoir savoir pourquoi un relais est activé. L'interface et l'historique doivent donc afficher les états et les causes.

Le contrôle automatique doit être réversible. Lorsqu'une condition disparaît, le système doit libérer les sorties correspondantes après confirmation du retour normal. Cela évite de laisser une charge active inutilement.

Le contrôle doit également être documenté par l'historique. Chaque action importante doit laisser une trace afin que l'utilisateur puisse comprendre le comportement du système après coup.

La cohérence entre action locale et notification est fondamentale. L'alarme sonore, la LED, le SMS et l'appel doivent correspondre à une situation réelle et confirmée.

Le contrôle automatique doit rester compatible avec la commande manuelle. L'utilisateur peut avoir besoin de tester un relais ou d'intervenir localement, mais cette action ne doit pas contredire une sécurité active.

L'automatisation doit être transparente. L'utilisateur doit pouvoir suivre l'état demandé, l'état appliqué et la cause de l'action. Cette transparence réduit les erreurs de maintenance.

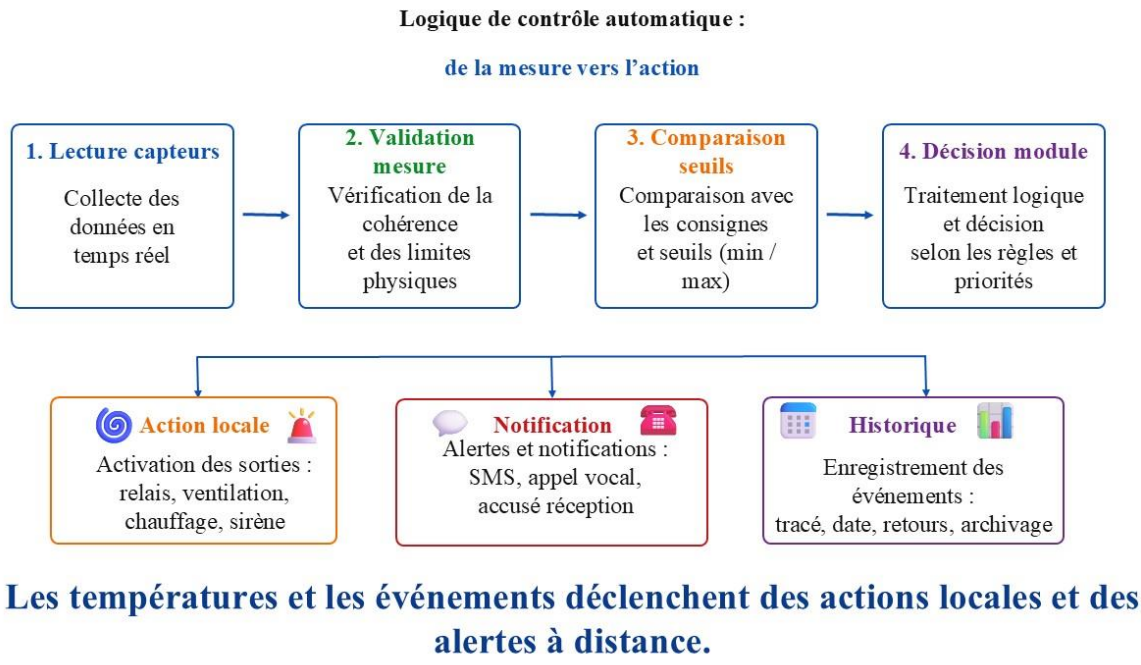


Figure 2-6 Logique de contrôle automatique : de la mesure vers l'action.

2.6.4 Interface de supervision

L'interface de supervision constitue le lien entre le système embarqué et l'utilisateur. Elle doit permettre de consulter les états, de modifier les réglages et de comprendre les alarmes sans accéder au code source.

Dans ModuGarde, l'interface est locale. Le système crée son propre point d'accès Wi-Fi. L'utilisateur se connecte avec un téléphone ou un ordinateur et ouvre l'adresse locale. Cette solution est adaptée aux environnements où Internet n'est pas garanti.

Les pages sont organisées par fonction. La page d'accueil présente l'état général. Les pages relais, téléphones, modules et fins de course permettent de configurer les fonctions. L'historique aide à comprendre les événements passés.

L'interface bilingue français/arabe améliore l'accessibilité. Elle permet à un utilisateur local de comprendre le système plus facilement, ce qui constitue un élément important dans un projet destiné au terrain.

L'interface doit limiter les erreurs de manipulation. Les relais réservés, les valeurs enregistrées et les états d'alarme doivent être clairement visibles. Une mauvaise interface peut rendre un bon système difficile à utiliser.

La traduction arabe et française améliore la présentation et l'accessibilité du projet. Elle montre que la solution est pensée pour l'environnement local et pas seulement pour une démonstration technique.

La supervision locale sans Internet est un point fort. Même dans un hangar isolé, l'utilisateur peut consulter le système à quelques mètres du boîtier.

L'interface doit éviter les pages trop chargées. Une information bien classée est plus utile qu'une accumulation de boutons. La séparation par fonctions améliore la lisibilité.

La WebView est également un outil de validation. Pendant les essais, elle permet de vérifier immédiatement l'état des capteurs, des relais et des alarmes, ce qui accélère la mise au point du prototype.

2.7 Critères de choix techniques

Les critères de choix techniques permettent de justifier les composants et l'architecture. Un bon choix n'est pas seulement le plus puissant ou le plus moderne ; c'est celui qui répond au besoin avec un coût, une complexité et une fiabilité acceptables.

Le premier critère est la disponibilité. Les composants doivent être accessibles pour le montage, le remplacement et la maintenance. Le deuxième critère est la compatibilité électrique et logicielle avec l'ESP32-S3. Le troisième est la facilité d'explication devant le jury.

Le quatrième critère est la sécurité. Les relais doivent être commandés de manière contrôlée, les entrées doivent éviter les faux états et la communication GSM ne doit pas bloquer les fonctions physiques. Le cinquième critère est l'évolutivité, car le système peut recevoir de nouveaux capteurs dans une version future.

Ces critères expliquent pourquoi le projet repose sur des modules connus, mais intégrés dans une logique avancée. La valeur du système ne vient pas seulement des composants, mais de leur coordination.

Les critères techniques doivent être évalués ensemble. Un composant très performant mais difficile à alimenter ou à expliquer peut-être moins adapté qu'un composant plus simple mais mieux intégré.

Le coût doit être mis en relation avec la valeur d'usage. Un système destiné aux agriculteurs doit rester accessible, mais il doit aussi être suffisamment fiable pour éviter les pertes liées aux défauts de surveillance.

Tableau 2.6 Critères de choix techniques appliqués au prototype

Critère	Application dans ModuGarde	Intérêt
Disponibilité	ESP32-S3, DS18B20, SIM800L, relais standards	Faciliter la réalisation et la maintenance
Simplicité	Interface WebView et configuration locale	Réduire la dépendance au code
Fiabilité	Hystérésis, confirmations, watchdog, persistance	Limiter les fausses alarmes
Sécurité	Relais sirène réservé, priorités et défauts capteurs	Éviter les actions incohérentes
Évolutivité	Architecture modulaire	Permettre humidité, gaz, cloud ou PCB industriel

2.8 Sécurité et fiabilité du système

La sécurité et la fiabilité sont des exigences centrales dans un système agricole. Un prototype peut fonctionner correctement pendant une démonstration courte, mais un système réellement utile doit continuer à fonctionner après plusieurs redémarrages, coupures et perturbations.

La première sécurité est la confirmation des alarmes. Une température ou un contact doit rester dans l'état anormal pendant une durée suffisante avant déclenchement. Cette règle limite les fausses alarmes liées aux parasites ou aux rebonds.

La deuxième sécurité est l'hystérésis. Les seuils ON et OFF doivent être séparés pour éviter les commutations rapides. Cela protège les relais et les équipements commandés, tout en rendant le comportement plus stable.

La troisième sécurité est la détection de défauts capteurs. Une sonde absente ne doit pas produire une décision climatique. Le système doit signaler le défaut et libérer les sorties concernées.

La quatrième sécurité est la persistance vérifiée. Les paramètres doivent rester après coupure, mais l'état physique doit être relu. Si une fin de course n'est plus active, le relais associé ne doit pas être réactivé uniquement parce qu'il était actif avant la coupure.

La cinquième sécurité concerne le GSM. L'échec d'un SMS ou l'absence de crédit ne doit pas bloquer le retour normal des relais. L'action physique et la notification doivent rester séparées.

La fiabilité doit être testée dans des conditions proches du réel. Les redémarrages, coupures, pertes GSM et changements de contacts doivent être reproduits pendant les essais. Un système qui fonctionne seulement en conditions idéales n'est pas suffisant.

La sécurité ne dépend pas d'un seul mécanisme. Elle résulte de la combinaison de confirmations, hystérésis, priorités, mémoire vérifiée, relecture physique et signalisation claire.

La documentation fait aussi partie de la fiabilité. Un système bien documenté est plus facile à installer, maintenir et améliorer. Le mémoire doit donc présenter clairement les choix et les limites.

La fiabilité du système dépend de la cohérence entre matériel et logiciel. Un bon code ne compensera pas une alimentation instable, tandis qu'un bon câblage ne corrigera pas une logique de commande mal pensée.

Le système doit être testé sur des situations normales et anormales. Les défauts de sonde, les coupures secteur, les échecs GSM et les redémarrages font partie des conditions à vérifier avant toute utilisation prolongée.

Tableau 2.7 Mécanismes de sécurité et de fiabilité.

Risque	Réponse de conception	Effet attendu
Fausse alarme	Confirmation temporelle	Éviter les déclenchements inutiles
Commutation rapide	Hystérésis et anti-cycle	Protéger relais et équipements
Sonde absente	Détection de défaut	Éviter une commande sur mesure fausse
Perte de réglages	NVS/LittleFS et vérification	Conserver la configuration
Reboot incohérent	Relecture des états physiques	Reprendre selon la réalité du terrain
GSM indisponible	File d'attente et action indépendante	Maintenir la commande locale

2.9 Avantages du système ModuGarde

ModuGarde présente plusieurs avantages par rapport à une commande manuelle. Il surveille en continu, applique des règles configurées, conserve les paramètres et alerte l'utilisateur. Cette continuité réduit les oublis et accélère les interventions.

Le système est également plus complet qu'un thermostat isolé. Il ne se limite pas à un seuil de température. Il intègre plusieurs sondes, des relais, des fins de course, la coupure secteur, la WebView, le GSM, l'historique et un module avicole.

L'autonomie locale est un autre avantage. L'interface fonctionne sans Internet grâce au point d'accès Wi-Fi. Les alertes à distance utilisent le GSM, ce qui convient aux zones agricoles où le réseau fixe n'est pas garanti.

La flexibilité est importante. Les relais peuvent être configurés selon les besoins. Les profils avicoles peuvent être adaptés. Les notifications peuvent être réglées selon les téléphones et les priorités. Cette flexibilité permet d'utiliser le même système dans plusieurs scénarios. [24]

Le système possède aussi une valeur pédagogique. Il réunit électromécanique, électronique, programmation, télécommunication et zootechnie. Il permet donc de présenter un travail complet et cohérent devant le jury.

L'avantage principal de ModuGarde est son intégration. Plusieurs fonctions habituellement séparées sont réunies dans une seule interface, ce qui améliore la compréhension et réduit les interventions dispersées.

Le système présente aussi un avantage documentaire. Les figures, tableaux, essais et annexes permettent de transformer le prototype en dossier technique présentable devant un jury et réutilisable pour une version future.

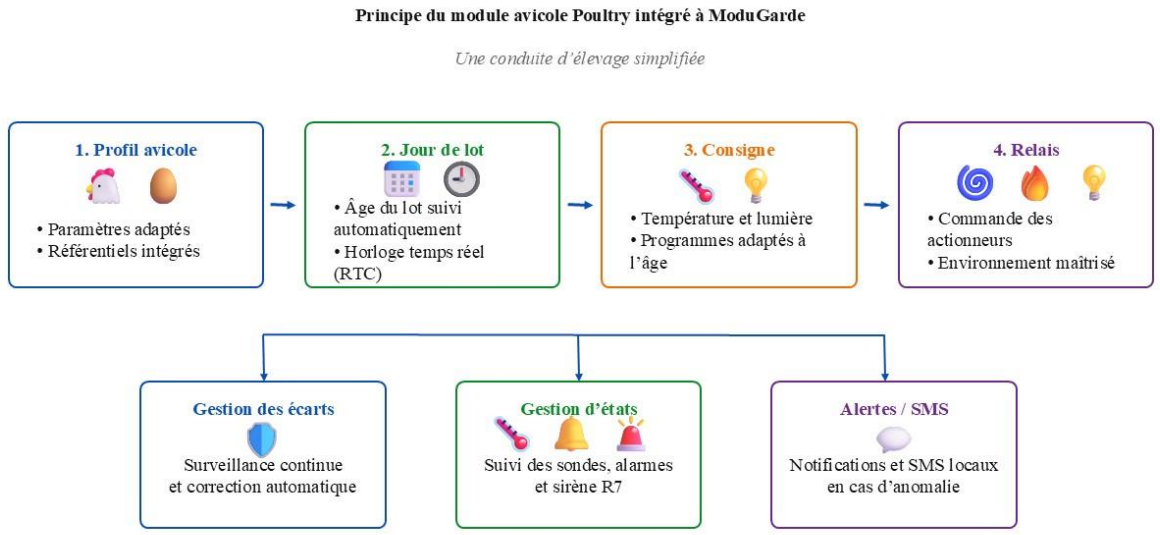


Figure 2-7 Principe du module avicole Poultry intégré à ModuGarde.

2.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté les références zootechniques nécessaires à la conception de ModuGarde, ainsi que la méthodologie suivie pour transformer les besoins du terrain en choix techniques. La température, l'humidité, la ventilation, la qualité de l'air et l'éclairage ont été analysés comme des paramètres complémentaires d'un même système [25].

La conception retenue repose sur un ESP32-S3, des sondes DS18B20, des relais, un module GSM, une horloge DS3231, des fins de course, une interface WebView et une logique avicole intégrée. Chaque élément répond à une exigence fonctionnelle identifiée.

Le chapitre suivant présente la réalisation expérimentale du prototype. Il décrit les composants, le câblage, le firmware, l'interface, les notifications et les essais de validation réalisés pour vérifier le fonctionnement du système.

Chapitre 3 :

Réalisation expérimentale

Chapitre 3 :
Réalisation expérimentale

3.1 Introduction

Après la présentation de l'état de l'art et des choix de conception, ce chapitre est consacré à la réalisation expérimentale du prototype ModuGarde MG-001. Il décrit le passage de l'architecture théorique vers un système câblé, programmé et vérifié.

La réalisation expérimentale vise à montrer que le projet n'est pas seulement une idée. Le prototype comporte un boîtier, des relais, des capteurs, un module GSM, une carte de commande, une interface WebView et une logique de fonctionnement testable.

Dans l'esprit du mémoire de référence, ce chapitre présente d'abord la problématique, puis les solutions traditionnelles, la solution proposée, les composants, le banc expérimental, le programme, les essais et les limites.

3.2 Problématique

La problématique expérimentale consiste à réaliser un système capable de surveiller un environnement avicole, de commander des sorties et de prévenir l'utilisateur sans dépendre d'une présence permanente sur place.

Le prototype doit répondre à plusieurs questions pratiques. Peut-il lire correctement plusieurs sondes ? Peut-il commander les relais selon des règles ? Peut-il conserver les paramètres après coupure ? Peut-il envoyer des alertes GSM ? Peut-il afficher les états dans une interface simple ?

La difficulté vient de l'intégration. Chaque fonction peut être testée séparément, mais le système final doit les faire fonctionner ensemble sans conflit. La WebView, le GSM, les relais, les capteurs et la mémoire doivent partager les ressources de l'ESP32-S3.

3.3 Solutions proposées traditionnelles

La solution traditionnelle la plus simple consiste à utiliser une commande manuelle. L'utilisateur allume ou éteint les ventilateurs et le chauffage selon son observation. Cette solution est économique, mais elle exige une présence fréquente et ne fournit aucune alerte distante.

Une deuxième solution consiste à utiliser un thermostat. Celui-ci commande une sortie selon un seuil. Il améliore la régulation, mais il reste limité : il ne gère pas toujours plusieurs sondes, plusieurs niveaux de ventilation, les fins de course, la coupure secteur, l'historique et le GSM.

Une troisième solution consiste à utiliser un automate programmable industriel. Cette solution est robuste, mais elle peut être coûteuse et moins flexible pour développer une interface WebView locale ou une logique GSM personnalisée dans le cadre d'un prototype universitaire.

ModuGarde cherche donc un compromis : une solution plus complète qu'un thermostat, plus accessible qu'un automate industriel, et plus intelligente qu'un ensemble de relais séparés.

3.4 Solution proposée dans notre projet étudié

La solution proposée est un système embarqué basé sur ESP32-S3. Le système lit les capteurs, applique les règles de décision, commande les relais, enregistre les événements et informe l'utilisateur à travers la WebView ou le GSM.

Le prototype est organisé autour d'un boîtier principal. Ce boîtier regroupe la carte de commande, les relais, les connexions, les voyants et les éléments nécessaires à la démonstration. Il représente la version expérimentale du système ModuGarde MG-001.

La solution comprend également une interface locale. L'utilisateur peut se connecter au point d'accès Wi-Fi du système et consulter les pages de supervision. Il peut configurer les modules sans modifier le code source.

Le système gère plusieurs familles d'événements : température haute ou basse, défaut de sonde, coupure secteur, état de fin de course, alarme avicole, notification GSM et retour normal.



Figure 3-1 Boîtier principal ModuGarde MG-001.

3.5 Composants

Les composants du prototype ont été choisis selon la méthodologie présentée au chapitre 2. Ils doivent permettre une démonstration fonctionnelle tout en restant disponibles, compréhensibles et compatibles avec l'ESP32-S3.

Le microcontrôleur assure le traitement central. Les sondes DS18B20 mesurent la température. Le DS3231 conserve l'heure. Le SIM800L assure les SMS et appels. Les relais commandent les actionneurs. Les fins de course représentent les états mécaniques. La LED alarme et la sirène signalent les défauts.

Le câblage doit séparer les fonctions de signal et les fonctions de puissance. Les entrées de l'ESP32 ne doivent jamais recevoir directement des tensions élevées. Les relais et les charges doivent être alimentés selon leurs caractéristiques.

Tableau 3.1 Composants matériels utilisés dans le prototype.

Composant	Rôle dans le système
ESP32-S3	Unité centrale de traitement, WebView, GPIO et logique de commande
DS18B20	Mesure numérique de température en plusieurs points
DS3231	Horloge temps réel pour programmes et historique
SIM800L	SMS, appels et USSD
Relais 1 à 8	Commande des sorties externes
Fins de course	Surveillance des états physiques
LED alarme	Signalisation visuelle locale
Bouton Wi-Fi	Activation ou désactivation du point d'accès

3.6 Description du banc expérimental

Le banc expérimental a pour objectif de reproduire les principales fonctions du système sans nécessiter un hangar complet. Il permet de montrer les températures, les relais, les fins de course, la coupure secteur simulée, le GSM et l'interface WebView.

La maquette de soutenance peut utiliser des voyants, des interrupteurs, des boutons ou de petits ventilateurs pour représenter les équipements réels. Cette approche pédagogique rend les réactions du système visibles devant le jury.

Les essais sont organisés par scénarios. Chaque scénario vérifie une fonction précise : lecture d'une sonde, activation d'un relais, déclenchement d'une alarme, envoi SMS, sauvegarde de configuration ou retour normal.

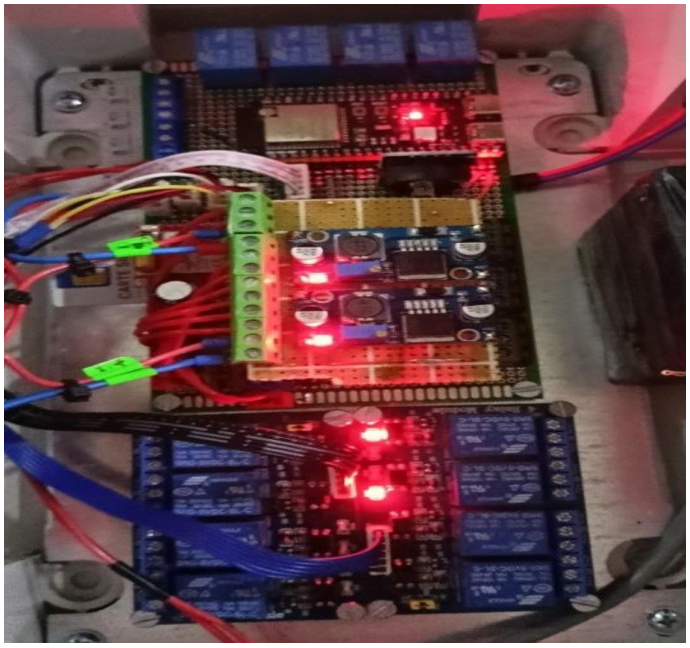


Figure 3-2 Vue interne du prototype pendant les essais.

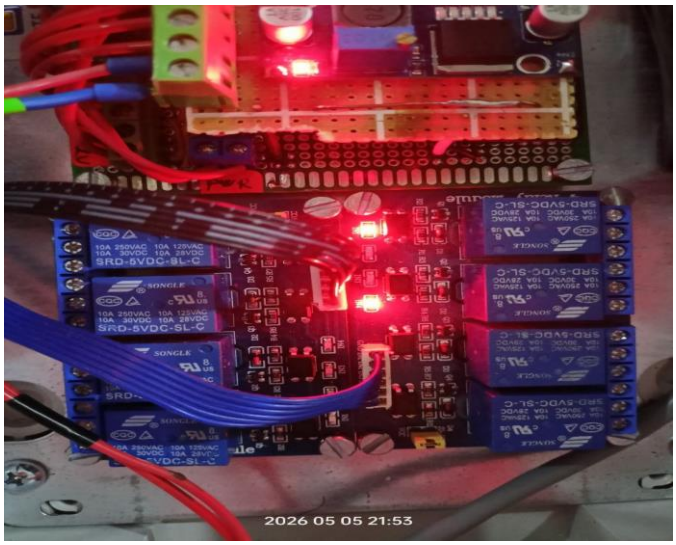


Figure 3-3 Vue rapprochée de la carte et du câblage.

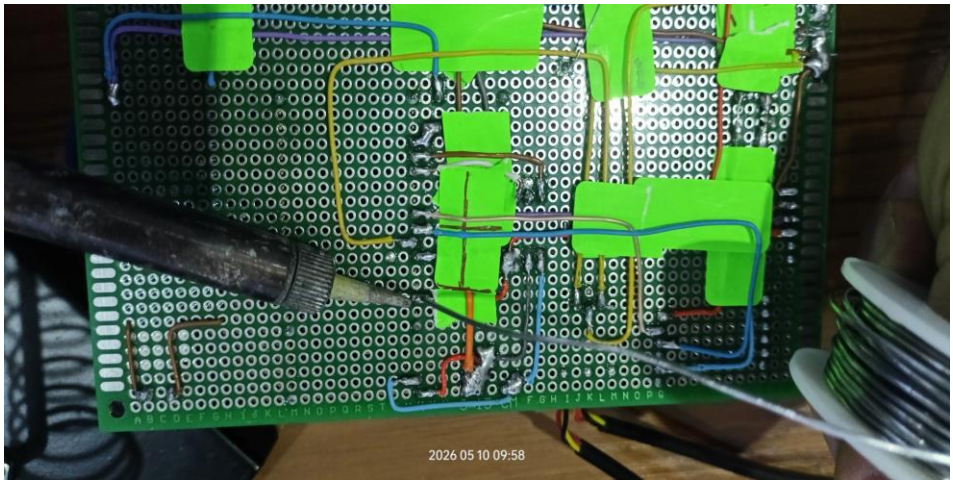


Figure 3-4 Organisation des raccordements de la maquette.

3.7 Architecture logicielle et programme embarqué

Le programme embarqué est développé sous environnement Arduino pour ESP32-S3. Le firmware regroupe plusieurs modules fonctionnels : température, alimentation, fins de course, relais, GSM, WebView, historique, configuration et module Poultry.

La boucle principale reste non bloquante. Les tâches sont exécutées par étapes, en fonction du temps écoulé. Cette méthode évite qu'un appel GSM, une lecture capteur ou une requête Web bloque le reste du système.

La configuration utilisateur est sauvegardée en mémoire non volatile. Le système vérifie les sauvegardes et utilise aussi le système de fichiers interne lorsque c'est nécessaire. Cette organisation améliore la reprise après redémarrage.

Le firmware intègre une logique de confirmation. Une alarme n'est pas déclenchée immédiatement sur une lecture isolée. Elle doit être confirmée pendant une durée configurée, ce qui limite les faux positifs.

3.7.1 Gestion logicielle des SMS et des commandes distantes

Dans le programme embarqué de ModuGarde, la communication GSM est intégrée comme un module fonctionnel du firmware. Elle ne se limite pas à l'envoi d'un message d'alerte, mais permet aussi de recevoir des commandes, d'identifier l'expéditeur, de vérifier son autorisation et d'exécuter l'ordre demandé sans arrêter la régulation locale.

Lorsqu'un SMS est reçu par le module SIM800L, le système commence par lire le numéro de l'expéditeur. Ce numéro est comparé avec les numéros enregistrés dans la configuration. Si le numéro n'est pas autorisé, la commande est rejetée afin d'éviter toute action non souhaitée sur les relais ou sur les alarmes. Cette étape représente une protection importante, car le système peut commander des équipements réels.

Après la vérification du numéro, le contenu du SMS est analysé. Le programme simplifie la lecture en acceptant les commandes principales sous une forme courte et claire. Par exemple, les commandes d'état, de diagnostic, de relais ou d'acquittement peuvent être envoyées directement

par téléphone. Cette méthode rend l'utilisation du système possible même sans connexion Internet et sans application mobile.

Le traitement des SMS doit rester non bloquant. Même si un SMS arrive, le microcontrôleur doit continuer à lire les sondes, surveiller les fins de course, commander les relais, gérer l'interface WebView et enregistrer les événements. Pour cette raison, les commandes reçues sont traitées de manière séquentielle, puis une réponse est envoyée à l'utilisateur lorsque l'action est acceptée ou refusée.

Cette organisation logicielle permet de séparer trois fonctions : la réception GSM, l'interprétation de la commande et l'action physique. Cette séparation améliore la fiabilité du système, car une difficulté de communication ne doit pas empêcher la régulation locale de fonctionner.

3.8 Interface WebView et supervision locale

L'interface WebView est l'un des éléments les plus importants du prototype. Elle permet d'utiliser le système sans câble de programmation et sans logiciel spécialisé. L'utilisateur se connecte au point d'accès Wi-Fi local, puis ouvre l'adresse du système.

La page d'accueil fournit une vue générale : état du système, températures, alarmes, relais et état des communications. Les autres pages permettent de configurer les téléphones, les modules, les fins de course, les priorités et le module Poultry.

L'interface doit être claire pour un utilisateur non spécialiste. Les fonctions doivent être séparées et les réglages sauvegardés explicitement. Les relais réservés et les états d'alarme doivent être visibles pour éviter les erreurs.

3.8.1 Intégration des commandes SMS dans la supervision locale

L'interface WebView permet à l'utilisateur de configurer les éléments nécessaires à la communication distante. Elle peut afficher les numéros autorisés, l'état du module GSM, les derniers événements, les alarmes actives et l'état des relais. Cette interface complète les SMS, car elle donne une vision locale plus détaillée du fonctionnement.

Une page ou une zone de diagnostic peut être consacrée aux commandes SMS disponibles. L'objectif est de permettre à l'utilisateur de consulter rapidement la syntaxe des commandes sans ouvrir le code source. Cette présentation réduit les erreurs de saisie et facilite l'exploitation du système sur le terrain.

Tableau 3.2 Exemple de commandes SMS intégrées à ModuGarde.

Commande SMS	Fonction réalisée
STATUS	Demande l'état général du système : températures, relais, alimentation et alarmes.
DIAG	Demande un diagnostic technique du système.
HELP	Demande la liste simplifiée des commandes disponibles.
R1ON à R6ON	Active le relais sélectionné si celui-ci n'est pas réservé par un module automatique.
R1OFF à R6OFF	Désactive le relais sélectionné si celui-ci n'est pas réservé.
R1 à R6	Bascule l'état du relais sélectionné.
R8ON, R8OFF, R8	Commande ou bascule le relais 8 selon le même principe.
SIRENON	Active manuellement la sirène.
SIRENOFF	Désactive manuellement la sirène.
ACK	Acquitte les alarmes actives.
ACK <id>	Acquitte une alarme précise, par exemple ACK TEMP1 MAX ou ACK POWER.
ACK OFF / SILENCE OFF / MAINTENANCE OFF	Annule le silence temporaire ou le mode maintenance.
SOLDE ou SOLD	Lance une consultation USSD du crédit de la carte SIM selon l'opérateur configuré.

Lorsqu'une commande est acceptée, le système renvoie un SMS de confirmation. Lorsqu'elle est refusée, par exemple si le numéro n'est pas autorisé ou si le relais est réservé, le système renvoie une réponse indiquant la cause du refus. Cette logique améliore la compréhension de l'utilisateur et évite les doutes sur l'état réel du système.



Figure 3-5 Page d'accueil WebView du système.



Figure 3-6 Présentation du système ModuGarde avec supervision locale.

3.9 Notifications GSM, appels et acquittement

La notification GSM représente une fonction essentielle du système ModuGarde MG-001. Dans un hangar agricole ou avicole, l'utilisateur n'est pas toujours présent à côté du bâtiment. Une élévation anormale de température, une coupure secteur, un défaut de sonde ou l'activation d'une fin de course peut apparaître pendant la nuit, pendant une absence ou pendant une autre

activité. Le module GSM permet donc de transmettre l'information à distance par SMS ou par appel téléphonique.

Dans le prototype, le module SIM800L assure cette communication. Il est piloté par le microcontrôleur ESP32-S3 à travers des commandes AT. Le système peut envoyer un SMS d'alerte, lancer un appel, recevoir une commande SMS ou interpréter un appel entrant provenant d'un numéro autorisé. Cette fonction complète la WebView locale, car elle permet une réaction même lorsque l'utilisateur n'est pas connecté au point d'accès Wi-Fi du système.

3.9.1 Types d'événements notifiés

Les événements qui peuvent générer une notification sont principalement liés à la sécurité et à l'état du bâtiment. Il peut s'agir d'une température supérieure au seuil maximal, d'une température inférieure au seuil minimal, d'une coupure de l'alimentation secteur, d'un défaut de lecture d'une sonde, d'un état anormal d'une fin de course ou d'une alarme liée au module avicole Poultry.

Chaque événement doit être identifié clairement. Le message envoyé à l'utilisateur doit contenir la nature de l'alarme, la zone concernée, la valeur mesurée lorsque cela est possible et l'action automatique réalisée par le système. Cette structure permet à l'utilisateur de comprendre rapidement la situation et de décider s'il doit intervenir.

Exemple de message SMS : ALERTE ModuGarde : TEMP1_MAX active. T=36.8 C. Ventilation active. Envoyer ACK pour acquitter.

3.9.2 Modes de notification

ModuGarde peut utiliser plusieurs modes de notification selon la configuration choisie par l'utilisateur. Une alarme peut déclencher seulement un SMS, seulement un appel, les deux à la fois, ou bien une action locale par relais. Cette souplesse permet d'adapter le système selon la gravité du défaut.

Tableau 3.3 Modes de notification utilisée dans ModuGarde.

Mode	Signification	Exemple d'utilisation
NONE	Aucune notification	Fonction désactivée ou surveillance locale seulement.
SMS	Envoi d'un SMS uniquement	Alerte informative.

CALL	Appel téléphonique uniquement	Alerte urgente.
BOTH	SMS puis appel	Défaut important nécessitant une réaction rapide.
RELAY	Action relais uniquement	Action locale sans notification distante.
SMS_RELAY	SMS avec action relais	Alerte avec déclenchement local.
CALL_RELAY	Appel avec action relais	Alerte critique locale et distante.
SMS_CALL_RELAY	SMS, appel et relais	Situation critique complète.

3.9.3 Commandes SMS à distance

En plus des notifications, ModuGarde peut recevoir des commandes SMS. Cette fonction permet à l'utilisateur d'interroger le système ou d'agir sur certains éléments à distance. Pour des raisons de sécurité, seules les commandes envoyées par les numéros autorisés sont acceptées.

Les commandes principales sont présentées dans le tableau 3.2. Le système répond à chaque commande par un SMS de confirmation ou de refus. Cette réponse est importante, car elle permet à l'utilisateur de savoir si l'ordre a été compris et exécuté.

3.9.4 Principe d'acquittement

L'acquittement est une fonction importante dans un système d'alarme. Il signifie que l'utilisateur a pris connaissance de l'événement. Il ne signifie pas forcément que le défaut physique a disparu. Par exemple, si une température haute est acquittée, cela indique seulement que l'utilisateur a reconnu l'alarme. La ventilation ou la surveillance thermique doit continuer tant que la condition réelle existe.

L'acquittement évite les répétitions inutiles de SMS, d'appels et de sirène. Sans acquittement, une alarme persistante pourrait provoquer plusieurs notifications successives et déranger l'utilisateur. Avec l'acquittement, le système devient plus exploitable, car il distingue la détection du défaut et la prise en compte par l'utilisateur.

Tableau 3.4 Loi d'acquittement par SMS.

Commande	Condition	Effet
ACK	Numéro autorisé	Acquitte les alarmes actives et arrête les répétitions immédiates.
ACK TEMP1_MAX	Alarme reconnue	Acquitte uniquement l'alarme de température haute de la sonde 1.
ACK POWER	Alarme secteur reconnue	Acquitte l'alarme de coupure secteur.
ACK OFF	Silence ou maintenance actif	Annule le mode silence ou maintenance.

SILENCE OFF	Silence actif	Réactive les notifications normales.
MAINTENANCE OFF	Maintenance active	Quitte le mode maintenance.

Cette logique permet un acquittement global ou ciblé. L'acquittement global est rapide lorsque l'utilisateur veut arrêter toutes les répétitions. L'acquittement ciblé est plus précis lorsqu'il veut traiter une alarme sans masquer les autres.

3.9.5 Acquittement par appel entrant

ModuGarde peut aussi utiliser les appels entrants comme moyen d'acquittement. Cette méthode est pratique, car l'utilisateur peut simplement appeler le numéro de la carte SIM du système sans rédiger un SMS. Le système vérifie le numéro appelant, raccroche automatiquement et applique la règle correspondante.

La loi proposée est organisée en trois niveaux.

Tableau 3.5 Loi d'acquittement par appels entrants.

Action utilisateur	Condition	Effet système
Premier appel autorisé	Appel reconnu par le système	Acquittement de l'incident actuel pendant 15 minutes.
Deuxième appel autorisé	Appel reçu pendant la période d'ACK	Passage en silence temporaire pendant 60 minutes.
Troisième appel autorisé	Appel reçu pendant le silence temporaire	Passage en mode maintenance pendant 10 heures.

Le premier appel sert donc à confirmer que l'utilisateur a vu l'alarme. Le deuxième appel permet de suspendre temporairement les notifications si l'utilisateur sait que le défaut va durer quelques minutes. Le troisième appel permet de passer en mode maintenance pendant une intervention longue.

Les appels doivent être comptés avec prudence. Le même appel peut parfois être détecté plusieurs fois par le module GSM. Le programme doit donc éviter le double comptage afin de ne pas passer accidentellement d'un simple acquittement vers le mode maintenance.

3.9.6 Différence entre ACK, silence et maintenance

L'acquittement court, le silence temporaire et le mode maintenance n'ont pas le même rôle. L'ACK est une prise en compte rapide de l'alarme. Le silence temporaire suspend les

notifications pendant une durée limitée. Le mode maintenance est réservé aux interventions longues.

Tableau 3.6 Comparaison des niveaux d'acquittement.

Niveau	Durée proposée	Effet sur SMS/appels	Effet sur sirène	Effet sur régulation
ACK	15 min	Arrêt des rappels immédiats	Sirène silencée temporairement	La régulation continue.
Silence temporaire	60 min	Notifications suspendues	Sirène silencée	La régulation continue.
Maintenance	10 h	Notifications suspendues	Sirène silencée	La régulation continue selon les règles actives.

Cette séparation est essentielle. L'acquittement ne doit pas désactiver les fonctions de sécurité. Il agit surtout sur les notifications et la sirène, tandis que les relais de ventilation, de chauffage ou d'éclairage continuent à dépendre des mesures et des conditions réelles.

3.10 Essais expérimentaux et validation

La validation expérimentale a pour objectif de vérifier que le prototype ModuGarde MG-001 fonctionne selon les exigences définies. Les essais ne concernent pas seulement l'allumage des relais, mais toute la chaîne fonctionnelle : mesure, traitement, décision, action, notification, acquittement, sauvegarde et reprise après redémarrage.

Les essais ont été organisés par scénarios. Chaque scénario correspond à une situation réelle possible dans un hangar agricole ou avicole. Cette méthode permet de vérifier le comportement du système de manière progressive et compréhensible.

3.10.1 Validation du démarrage et de la supervision locale

Le premier essai concerne la mise sous tension du système. Après alimentation, l'ESP32-S3 doit initialiser les broches, démarrer le point d'accès Wi-Fi, charger les paramètres sauvegardés, initialiser les sondes et préparer le module GSM. L'utilisateur doit pouvoir accéder à la WebView et observer l'état général du système.

Le résultat attendu est l'apparition de l'interface locale, l'affichage des températures disponibles, l'état des relais, l'état des fins de course et l'état général du système. Cet essai valide la base du fonctionnement avant de tester les alarmes.

3.10.2 Validation des seuils de température

La validation thermique consiste à simuler une température haute ou basse. Lorsque la température dépasse un seuil configuré, le système doit activer le niveau de ventilation correspondant ou générer une alarme. Lorsque la température revient dans la zone normale, le système doit arrêter l'action selon l'hystérésis définie.

L'objectif est de vérifier que le système ne commute pas trop rapidement autour du seuil. L'hystérésis évite l'activation et la désactivation répétées des relais. Cette partie est importante pour protéger les équipements commandés et rendre la régulation stable.

3.10.3 Validation de la coupure secteur

Un essai de coupure secteur permet de vérifier la réaction du système devant une perte d'alimentation. La coupure doit être détectée, enregistrée et signalée selon le mode de notification configuré. Après rétablissement, le système doit reprendre un fonctionnement normal et relire les états réels au lieu de restaurer aveuglément une ancienne sortie.

Cet essai montre l'importance de la mémoire persistante et de la lecture physique des entrées au démarrage.

3.10.4 Validation des fins de course

Les fins de course sont testées par ouverture et fermeture des contacts. Chaque changement d'état doit être lu par le microcontrôleur et interprété selon la règle configurée. Le système peut alors afficher l'état dans la WebView, activer une sortie, déclencher une alarme ou enregistrer l'événement.

Cet essai valide la capacité du système à surveiller des états physiques réels, comme une porte, un volet ou une position mécanique.



Figure 3-7 Démonstrateur réduit pour la soutenance.

Chaîne de validation expérimentale proposée



Figure 3-8 Chaîne de validation expérimentale proposée.

3.10.5 Validation des SMS, appels et acquittements

La validation GSM constitue une partie importante du prototype. Elle permet de vérifier l'envoi des alertes, la réception des commandes SMS, la reconnaissance des numéros autorisés et la logique d'acquittement.

Tableau 3.7 Scénarios de validation GSM et acquittement.

Essai	Méthode	Résultat attendu
SMS de test	Lancer un SMS depuis le système	Le téléphone reçoit le message.
Commande STATUS	Envoyer STATUS depuis un numéro autorisé	Le système répond avec l'état général.
Commande DIAG	Envoyer DIAG	Le système renvoie un diagnostic technique.
Commande inconnue	Envoyer une commande non reconnue	Le système répond par un refus ou ignore la commande.
Numéro non autorisé	Envoyer une commande depuis un autre téléphone	Aucune action dangereuse n'est exécutée.

Commande relais	Envoyer R1ON puis R1OFF	Le relais change d'état si non réservé.
Relais réservé	Commander un relais utilisé par un module automatique	Le système refuse la commande.
Alerte température	Simuler une température haute	SMS ou appel envoyé selon configuration.
Acquittement SMS	Envoyer ACK après une alarme	Les rappels sont arrêtés temporairement.
Acquittement ciblé	Envoyer ACK TEMP1_MAX	Seule l'alarme ciblée est acquittée.
Premier appel	Appeler le système depuis un numéro autorisé	ACK de 15 minutes.
Deuxième appel	Appeler encore pendant l'ACK	Silence temporaire de 60 minutes.
Troisième appel	Appeler encore pendant le silence	Maintenance de 10 heures.
Annulation	Envoyer ACK OFF ou SILENCE OFF	Retour au fonctionnement normal des notifications.

Ces essais démontrent que le GSM n'est pas seulement un canal d'alerte. Il devient aussi un moyen de commande et de réponse à distance. Cela améliore l'exploitation du système dans un bâtiment éloigné.

3.10.6 Tableau général de validation expérimentale

Tableau 3.8 Synthèse des essais expérimentaux.

Fonction testée	Action réalisée	Résultat attendu
Démarrage	Mise sous tension	Initialisation du système, Wi-Fi et lecture des paramètres.
WebView	Connexion au point d'accès local	Accès aux pages de supervision.
Température	Simulation d'un seuil haut ou bas	Activation de la ventilation, du chauffage ou d'une alarme.
Hystérésis	Variation autour du seuil	Absence de commutations rapides.
Relais	Commande locale ou SMS	Changement d'état du relais autorisé.
Coupure secteur	Simulation de perte d'alimentation	Notification et reprise correcte après retour.
Fins de course	Changement d'état d'un contact	Affichage, action ou alarme selon configuration.
GSM	Déclenchement d'une alarme	Envoi SMS ou appel selon le mode choisi.
Acquittement	SMS ACK ou appel entrant	Arrêt temporaire des rappels et maintien de la surveillance.
Persistance	Sauvegarde puis redémarrage	Paramètres conservés après coupure.

3.11 Résultats obtenus et discussion

Les essais expérimentaux montrent que le prototype ModuGarde MG-001 permet de regrouper dans un seul système plusieurs fonctions qui sont souvent séparées dans les installations agricoles : mesure thermique, commande des relais, supervision locale, notification GSM, appels, acquittement, historique et sauvegarde des paramètres.

La partie GSM apporte une amélioration importante. L'utilisateur peut recevoir une alarme sans être présent dans le hangar. Il peut aussi répondre au système par SMS ou par appel. Cette possibilité rend le prototype plus proche d'un cas réel d'exploitation, car un éleveur ou un technicien n'est pas toujours disponible devant l'interface locale.

L'acquittement améliore la qualité de l'alerte. Sans acquittement, une alarme persistante peut provoquer des répétitions de SMS, d'appels ou de sirène. Cela peut fatiguer l'utilisateur et réduire son attention. Avec l'acquittement, le système sait que l'utilisateur a pris connaissance de l'incident, tout en continuant à surveiller la condition réelle.

La distinction entre ACK, silence temporaire et maintenance rend le système plus flexible. L'ACK est adapté à une prise en compte rapide. Le silence temporaire est utile pendant une intervention courte. Le mode maintenance est utile pendant une intervention longue ou un essai technique. Dans tous les cas, la régulation locale doit rester active et ne pas dépendre uniquement de la communication GSM.

Les essais montrent aussi certaines limites. Le module SIM800L demande une alimentation stable, car il peut consommer des pics de courant pendant l'émission. Une alimentation insuffisante peut provoquer des redémarrages ou des échecs d'envoi. La qualité du réseau GSM, le crédit de la carte SIM et la configuration correcte des numéros autorisés influencent également la fiabilité des notifications.

Le prototype reste donc une base expérimentale solide, mais une version industrielle nécessiterait des protections électriques plus robustes, une alimentation secourue, une carte PCB professionnelle, des connecteurs adaptés, une meilleure protection contre les parasites et des essais prolongés dans un vrai bâtiment avicole.

Tableau 3.9 Synthèse des résultats et limites.

Élément évalué	Résultat obtenu	Limite observée ou amélioration possible
Mesure thermique	Lecture des sondes et exploitation des seuils	Ajouter humidité et qualité de l'air.
Relais	Commande locale et distante possible	Prévoir protections pour charges réelles.
WebView	Supervision locale simple	Améliorer l'ergonomie de l'interface.
SMS	Alertes et commandes possibles	Dépend du réseau et du crédit SIM.
Appels	Acquittement rapide possible	Nécessite une bonne gestion du double comptage.
ACK	Réduction des répétitions d'alarme	Ne doit pas masquer un défaut réel.
Persistance	Paramètres conservés après redémarrage	Séparer clairement paramètres et historique.
Prototype	Validation fonctionnelle réussie	Nécessite industrialisation pour usage permanent.

Tableau 3.10 Endpoints API utiles pour le diagnostic local.

Endpoint	Utilisation
/api/status	Consulter l'état général du système
/api/config	Lire ou vérifier la configuration
/api/history	Afficher l'historique des événements
/api/poultry/status	Suivre le module avicole
/api/alarm-led/test	Tester le voyant d'alarme
/api/gsm/reset	Réinitialiser le modem en maintenance



Figure 3-9 Support de communication et de valorisation du système.

En conclusion de la discussion, ModuGarde ne doit pas être considéré comme un simple thermostat amélioré. Il s'agit d'une plateforme embarquée capable de mesurer, commander, notifier, recevoir des ordres, acquitter des alarmes et reprendre son fonctionnement après redémarrage. Cette architecture correspond mieux aux contraintes pratiques d'un hangar agricole ou avicole.

3.12 Conclusion

Ce chapitre a présenté la réalisation expérimentale de ModuGarde MG-001. Le prototype réunit un ESP32-S3, des sondes de température, un module GSM, une horloge temps réel, des relais, des fins de course, une interface WebView et une logique de sauvegarde.

Les essais réalisés montrent que le système peut mesurer, décider, agir, notifier et mémoriser. La réalisation confirme donc la faisabilité d'une plateforme embarquée intelligente pour la surveillance climatique et l'alerte dans les hangars agricoles et avicoles.

Les limites identifiées ouvrent la voie à une version plus industrielle, avec protections matérielles, capteurs complémentaires, essais longue durée et documentation utilisateur.

Conclusion générale

Ce travail a porté sur la conception et la réalisation de ModuGarde, un système embarqué intelligent destiné à la surveillance thermique, à la régulation climatique et à l'alerte multicanale dans les hangars agricoles et avicoles.

L'étude a d'abord montré que la surveillance climatique ne peut pas être réduite à une simple commande de thermostat. Les besoins réels du terrain exigent une mesure fiable, des actions graduelles, une interface compréhensible, une notification à distance, une mémoire persistante et une reprise cohérente après redémarrage.

Le système réalisé associe un ESP32-S3, des sondes DS18B20, une horloge DS3231, un module GSM SIM800L, des relais, des fins de course, une LED d'alarme, une interface WebView locale et un module avicole Poultry. Cette architecture permet de mesurer, traiter, commander, alerter et mémoriser les événements.

Le prototype ModuGarde MG-001 présente un intérêt technique et pédagogique. Il montre l'intégration de plusieurs domaines : électromécanique, électronique, informatique embarquée, télécommunication et zootechnie. Il constitue une base cohérente pour une future version industrielle.

Les perspectives principales concernent l'ajout de capteurs d'humidité et de qualité de l'air, la réalisation d'une carte PCB professionnelle, l'amélioration des protections électriques, l'intégration d'une alimentation secourue et la validation dans un vrai bâtiment avicole sur une durée prolongée.

Références bibliographiques

[1] Halhoul Merabet, G., et al.. Intelligent Building Control Systems for Thermal Comfort and Energy-Efficiency: A Systematic Review of Artificial Intelligence-Assisted Techniques. article de synthèse. URL : https://arxiv.org/abs/2104.02214

[2] FAO. Poultry housing and management in developing countries. guide technique. URL : https://www.fao.org/4/al734e/al734e00.pdf

[3] Aviagen. Ross Broiler Management Handbook. guide de conduite. URL : https://aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_Broiler/Aviagen-ROSS-Broiler-Handbook-EN.pdf

[4] Yefsah, R. & Ziane, O.. Conception et réalisation d'un système de contrôle automatique d'un bâtiment d'élevage avicole. mémoire, UMMTO. URL : https://dspace.ummto.dz/bitstream/handle/ummto/6736/YefsahRabah_ZianeOuiza.pdf

[5] Espressif Systems. Arduino-ESP32 Documentation. documentation officielle. URL : https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/

[6] Analog Devices / Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. data sheet. URL : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf

[7] Espressif Systems. ESP32-S3 Series Datasheet. documentation technique officielle. URL : https://documentation.espressif.com/esp32-s3_datasheet_en.pdf

[8] Espressif Systems. ESP-IDF Programming Guide - Wi-Fi / SoftAP. documentation officielle. URL : https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/network/esp_wifi.html

[9] SIMCom. SIM800 Series AT Command Manual. documentation technique. URL : https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/sim800_series_at_command_manual_v1.01.pdf

[10] Arduino. LittleFS_esp32 library. documentation de bibliothèque. URL : https://docs.arduino.cc/libraries/littlefs_esp32/

[11] International Electrotechnical Commission. IEC 61508 & Functional Safety. overview officiel. URL : https://assets.iec.ch/public/acos/IEC%2061508%20%26%20Functional%20Safety-2022.pdf

[12] Espressif Systems. ESP32-S3-WROOM-1 / ESP32-S3-WROOM-1U Datasheet. documentation technique officielle. URL : https://documentation.espressif.com/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf

[13] Cobb-Vantress. Cobb Broiler Management Guide. guide de conduite. URL : https://www.cobbgenetics.com/assets/Cobb-Files/Broiler-Guide_English-2021-min.pdf

[14] ITELV - Institut Technique des Elevages, Algérie. Pratique d'elevage du poulet de chair. document technique avicole. URL : https://www.itelv.dz/download/pratique-delevage-du-poulet-de-chair/

[15] Aviagen. Ross Broiler Pocket Guide. guide technique. URL : https://aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_Broiler/Aviagen-ROSS-Broiler-PocketGuide-EN.pdf

[16] Kirouani, L.. Performances des élevages avicoles, segment poulet de chair dans la wilaya de Bejaia. Revue Agriculture, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2020. URL : https://revue-agro.univ-setif.dz/documents-agri/Volume11-N1-2020/Performances-elevages-avicoles-segment-poulet-chair-Bejaia.pdf

[17] Hy-Line International. Hy-Line Brown Performance Standards Guide. guide technique. URL : https://www.hyline.com/filesimages/Hy-Line-Products/Hy-Line-Product-PDFs/Brown/BRN%20STD%20ENG.pdf

[18] Lohmann Breeders. Management of laying hens to minimize heat stress. document technique. URL : https://lohmann-breeders.com/wp-content/uploads/pdfs-tecnicos/Management%20of%20laying%20hens%20to%20minimize%20heat%20stress-2009.pdf

[19] Université Kasdi Merbah Ouargla. Étude de l'impact des facteurs d'ambiance sur l'élevage du poulet de chair dans la région de Touggourt. mémoire universitaire. URL : https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/10973/3/NOUHA.pdf

[20] ITELV - Institut Technique des Elevages, Algérie. La poule pondeuse et ses oeufs. document technique avicole. URL : https://www.itelv.dz/download/la-poule-pondeuse-et-ses-oeufs/

[21] Analog Devices / Maxim Integrated. DS3231 Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal. data sheet. URL : https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf

[22] Texas Instruments. LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator. data sheet. URL : https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf

[23] Texas Instruments. BQ769x0 3-Series to 15-Series Cell Battery Monitor Family for Li-Ion and Phosphate Applications. data sheet. URL : https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76920.pdf

[24] Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj. Mémoire sur l'évolution de l'aviculture et le poulet de chair en Algérie. mémoire universitaire. URL : https://dspace.univ-bba.dz/server/api/core/bitstreams/ba6490f1-ae05-4118-acae-c2228cfb4f89/content

[25] Kabli, L. / ITELV. Rétrospective du secteur avicole en Algérie, revue INVA n°18. document de synthèse sectorielle. URL : https://www.itelv.dz/download/nouveau-dans-archives-retrospective-du-secteur-avicole-en-algerie-in-revue-inva-n-18-decembre-2013/

Annexes

Annexe A : Procédure de démonstration rapide

Cette annexe propose une procédure de démonstration courte destinée à la soutenance. Elle permet de montrer les principales fonctions sans entrer dans tous les réglages avancés.

Étape 1 : alimenter le boîtier et vérifier l'allumage du voyant de vie. Étape 2 : se connecter au point d'accès Wi-Fi ModuGarde et ouvrir l'interface WebView. Étape 3 : consulter les températures et l'état général. Étape 4 : modifier un seuil et sauvegarder. Étape 5 : simuler une alarme température. Étape 6 : vérifier l'activation du relais et l'apparition de l'événement dans l'historique. Étape 7 : simuler un retour normal.

La démonstration peut être enrichie par un test de fin de course, un test de coupure secteur et une tentative de notification GSM si la carte SIM et le réseau sont disponibles.

Annexe B : Recommandations matérielles pour exploitation terrain

Pour une exploitation réelle, le prototype doit être renforcé matériellement. Le SIM800L doit disposer d'une alimentation stable, dimensionnée pour les pics de courant. Les relais doivent être adaptés aux charges commandées. Les masses doivent être propres et les câbles longs doivent être protégés contre les parasites.

Les entrées de fins de course doivent utiliser des contacts secs, un filtrage adapté et éventuellement une isolation optique. Les charges inductives, comme les moteurs ou contacteurs, doivent recevoir des protections contre les surtensions de coupure.

Le boîtier doit protéger l'électronique contre la poussière, l'humidité et les manipulations accidentelles. Une version industrielle devrait intégrer des fusibles, un sectionnement clair, des borniers normalisés et une séparation entre puissance et logique.