

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT	v
SOMMAIRE	vii
TABLE DES FIGURES	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre I : Problématique de la surveillance du stockage de grain.....	7
1. Introduction	7
2. Les céréales dans l'économie mondiale et française	9
3. Les problèmes relatifs au stockage des céréales.....	11
3.1. L'altération de la qualité des grains stockés	12
3.2. Les problèmes de conservation des grains posés par les infestations d'insectes.....	13
4. Les différentes approches de la lutte contre les insectes	17
4.1. La lutte physique	17
4.2. La lutte chimique.....	22
4.3. La lutte biologique.....	23
4.4. La lutte intégrée.....	24
5. Les techniques de détection de la présence d'insectes	24
5.1. La détection acoustique	24
5.2. La détection par rayons X.....	25
5.3. La détection par la mesure du dioxyde de carbone	25
5.4. La détection par spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS)	26
5.5. La détection par conductance électrique	26
6. Vers un système complet de surveillance des grains stockés dans les silos	28
7. Contexte et présentations des objectifs généraux d'ECOSILO	30
8. Problématique de la thèse.....	31
9. Conclusion.....	32
Chapitre II : Conception d'un système de surveillance des stockages de grains en silos	35
1. Introduction	35
2. Démarche générale de conception : analyse des besoins et choix des solutions	36
3. La conception d'un système complet SILOCARE.....	38
3.1. L'architecture du système SILOCARE	38
4. La prévention.....	40

4.1. Les modèles biologiques de croissance	40
4.2. Les exigences de représentation thermique du silo	46
5. Les choix du système de détection de la présence d'insectes.....	54
5.1. Détection de présence par la détection de CO ₂	55
5.2. Détection de la présence d'insectes par sonde acoustique	55
6. Conclusion.....	66
Chapitre III : Les technologies de mise en œuvre	69
1. Introduction	69
2. Les propositions SILOTEST et leurs axes d'applications.....	70
3. Les exigences générales technologiques et industrielles	71
4. Le dispositif de contrôle à l'entrée du Silo : SILOTEST 2	72
5. Le dispositif de surveillance en surface du tas de grains SILOTEST 1	74
6. La surveillance de toute la cellule de stockage : SILOTEST 3	80
7. Le logiciel SILOSOFT pour la conduite du système SILOCARE	84
7.1. Les couches logicielles.....	86
7.2. L'interfaçage utilisateur.....	87
8. Conclusion.....	88
Chapitre IV : Évaluation et validation des solutions ECOSILO	91
1. Introduction	91
2. Les étapes de validations fonctionnelles des modules capteurs	92
3. Les résultats obtenus dans les essais de laboratoire	93
3.1. Les performances de l'analyse de la température et de la concentration en CO ₂	93
3.2. La mise au point et les performances en détection de la sonde acoustique	104
3.3. Analyse comparative des résultats sur les capteurs	117
4. L'expérimentation du système complet SILOCARE sur site réel.....	118
4.1. Présentation du système installé.....	118
4.2. Déploiement de la sonde SILOTEST 3	118
4.3. Résultats de l'expérimentation	121
4.4. Insuffisances du système constatées.....	122
5. Discussion	123
6. Conclusion.....	124
CONCLUSION GÉNÉRALE	125
BIBLIOGRAPHIE	131
Annexe A.....	141
1. La méthode MMSE pour dé-bruitage du signal	141

2. Estimation des paramètres du modèle de mélange GMM	143
2.1. L'algorithme EM	144
2.2. Propriétés d'EM	144
Annexe B	145
1.1. SILOTEST2	148
1.2. SILOTEST 3	150
Liste des publications personnelles	153
Revue Internationale (avec actes et comité de lecture)	153
Conférences Internationales (avec actes et comité de lecture)	153
Conférences Nationales (avec actes et comité de lecture)	153

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Arbre taxinomique des réserves à céréales en Méditerranée occidentale	8
Figure 2 : Production, utilisation et stockage des céréales [22]	9
Figure 3 : Les 6 premiers exportateurs de céréales (incluant le riz) en 2011 [24]	10
Figure 4 : La production céréalière (hors riz) en France (2012) [24].....	10
Figure 5 : Développement des parasites dans les entrepôts de grain en fonction de la température et de l'humidité	14
Figure 6 : Charançon de riz (<i>Sitophilus oryzae</i>).....	14
Figure 7 : Tribolium (<i>Tribolium castaneum</i>).....	14
Figure 8 : Cycle de développement du charançon : œuf, larve, nymphe et adulte	15
Figure 9 : Grains vidés par le charançon	15
Figure 10 : Le développement exponentiel théorique de la population des insectes.....	16
Figure 11 : Pièges à insectes.....	18
Figure 12 : Changement de la concentration du CO ₂ dans le temps causé par le stockage hermétique [76]	22
Figure 13 : Les modules constituant du système SILOCARE.....	39
Figure 14 : Architecture du système SILOCARE	40
Figure 15 : Taux de développement des insectes en fonction de la température	42
Figure 16 : Taux de développement du charançon en fonction de l'humidité du grain (source [130])	46
Figure 17 : La structure 3D simulée sous COMSOL	49
Figure 18 : Comportement thermique du grain après une exposition de 6 mois à une température de 35°C.....	50
Figure 19 : Evolution de la température en fonction du temps (point 2,5 m).....	51
Figure 20 : Distribution de la température en fonction de la distance de la paroi.....	51
Figure 21 : Apprentissage du modèle thermique de la cellule de stockage.....	53
Figure 22 : Apprentissage du paramètre thermique S et la détection d'un point chaud.....	54
Figure 23 : Etapes de détection acoustique	56
Figure 24 : Le processus de la détection acoustique	56
Figure 25 : La segmentation du signal	59
Figure 26 : Processus de calcul des coefficients MFCC	60
Figure 27 : Fenêtrage par la fenêtre Hamming.....	60
Figure 28 : Echelle de Mel	61
Figure 29 : Le banc de filtres selon l'échelle Mel	61
Figure 30 : Spectre lisse selon l'échelle Mel.....	62
Figure 31 : Exemple de modèle de mélange gaussienne (une dimension)	63

Figure 32 : Etape MAP.....	65
Figure 33 : Etape M.....	65
Figure 34 : Schéma fonctionnel de SILOTEST 2	73
Figure 35 : SILOTEST 2.....	74
Figure 36 : Le schéma structurel de la sonde multi-sensorielle SILOTEST I.....	75
Figure 37 : Schéma 3D de la sonde SILOTEST 1.....	76
Figure 38 : Modèle du piège à insectes	77
Figure 39 : Organigramme du principal programme embarqué.....	77
Figure 40 : Architecture électronique de la sonde SILOTEST 1	78
Figure 41 : La carte microcontrôleur.....	79
Figure 42 : Le prototype final SILOTEST 1	79
Figure 43 : Sonde SILOTEST 3 implémentée dans un silo	81
Figure 44 : Schéma fonctionnel des modules SILOTEST 3	81
Figure 45 : Capteurs utilisés.....	82
Figure 46 : Montage du module multi capteurs SILOTEST 3	83
Figure 47 : Montage de la sonde et sertissage sur le câble.....	84
Figure 48 : Architecture modulaire du logiciel SILOSOFT.....	85
Figure 49 : La communication entre les différentes couches logicielles.....	86
Figure 50 : IHM principale du logiciel SILOSOFT	88
Figure 51 : Banc de test mis en place avec l'entreprise AB7	95
Figure 52 : Humidité relative inter granulaire et teneur en eau du grain durant l'expérimentation	96
Figure 53 : Evolution théorique du taux de développement (R_m) des charançons pendant l'expérimentation	97
Figure 54 : Taux de multiplication théorique des insectes durant l'expérimentation.....	98
Figure 55 : Evolution théorique du nombre d'insectes en fonction des prélèvements réalisés.....	99
Figure 56 : Présentation des températures mesurées, prédites sans apprentissage et prédites avec apprentissage	100
Figure 57 : Influence de l'énergie dégagée par les insectes sur la température du grain	101
Figure 58 : Evolution de la concentration du CO ₂ dans le grain	102
Figure 59 : Comparaison de la concentration du CO ₂ mesurée par rapport au nombre d'insectes.....	103
Figure 60 : Chaîne d'acquisition des signaux acoustiques.....	104
Figure 61 : Carte Fubarino SD	105
Figure 62 : Interface de gestion des enregistrements acoustiques.....	105
Figure 63 : Signal temporel généré par les insectes	106
Figure 64 : Le spectre fréquentiel d'un signal d'insecte	107
Figure 65 : Analyse temps-fréquence des signaux générés par les insectes.....	107
Figure 66 : Chaîne de traitement des signaux acoustiques.....	108

Figure 67 : Spectre des différents filtres numériques.....	109
Figure 68 : Signal avant et après filtrage numérique.....	109
Figure 69 : Superposition du signal avant débruitage (en bleu) et après débruitage (en rouge).....	110
Figure 70 : Segmentation de longueur fixe	111
Figure 71 : Calcul l'échelle Mel dans la bande utile	112
Figure 72 : Les valeurs des 26 coefficients MFCCs.....	112
Figure 73 : Représentation un segment contenant 2 impulsions d'insecte.....	112
Figure 74 : Tracé des valeurs des 12 coefficients de 3 fragments	112
Figure 75 : Résultat de la classification non supervisée.....	113
Figure 76 : Corrélation entre le nombre d'insectes et la moyenne des détections	116
Figure 77 : Installation de la sonde SILOTEST 3	119
Figure 78 : Architecture réseau du système SILOCARE.....	119
Figure 79 : Exemple d'affichage de la concentration du CO2 inter granulaire.....	120
Figure 80 : Interface de configuration du logiciel SILOSOFT	121
Figure 81 : Interface principale du logiciel SILOSOFT : exemple réel de l'expérimentation de LAVAUR	122
Figure 82 : La courbe d'atténuation de l'estimateur MMSE en fonction de ξ_k	142
Figure 83 : La courbe d'atténuation de l'estimateur MMSE en fonction de γ_k	142
Figure 84 : Interconnexion des différentes cartes électroniques embarquées dans la sonde SILOTEST 1	145
Figure 85 :Circuit amplificateur et capteur de température et d'humidité	146
Figure 86 : schéma électrique de la carte contrôleur de la sonde SILOTES1	147
Figure 87 : Schéma fonctionnel des cartes embarquées dans le SILOTS2	148
Figure 88 : Fiche technique de la carte Fubarino SD	149
Figure 89 : Schéma électrique de la carte pc de la sonde SILOTEST 3.....	150
Figure 90 : Schéma électrique de la carte du module SILOTEST 3	151
Figure 91: Filtre passe bande et l'amplificateur embarqué dans le module SILOTEST3.....	152

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse porte sur la conception et le prototypage d'un système de surveillance de la qualité des grains dans les silos de stockage. Il s'inscrit dans un ensemble de travaux conduits dans le groupe N2IS du LAAS-CNRS, sur la surveillance multi-sensorielle des systèmes [1]–[4]. Le concept de base proposé consiste à répartir des capteurs dans le système à surveiller, collecter les informations et construire un modèle expérimental du fonctionnement habituel du système pour en extraire l'apparition de dysfonctionnements. C'est ce même concept que nous allons utiliser dans la surveillance des silos.

Dans la plupart des pays, les céréales sont la base de l'alimentation humaine; notons qu'il en est de même pour l'alimentation animale. Les céréales sont produites sur une base saisonnière et ne sont généralement récoltées qu'une seule fois par an. Leurs conservations indispensables sont assujetties aux conditions climatiques et ne sont donc pas à l'abri de mécanismes d'échecs. Pratiquement, afin de garantir une alimentation permanente de la population mondiale en matière de céréales (la plupart de la production mondiale de maïs, de blé, de riz, de sorgho et de mil), les récoltes doivent être stockées dans des entrepôts durant des périodes variables, allant de quelques jours à plus d'un an [5]. Le stockage des céréales occupe donc une place essentielle dans l'économie des pays développés et en voie de développement.

Grâce au stockage, le marché des céréales se caractérise par une demande relativement stable tout au long de l'année mais avec un approvisionnement du marché mondial largement fluctuant, lié à des rendements très irréguliers. De manière générale, la consommation personnelle de chaque individu en matière d'aliments de base tels que les céréales ne varie pas beaucoup d'une saison à l'autre ou d'une année à l'autre. La demande de céréales est donc « inélastique », ce qui signifie que les variations des prix du marché ne conduisent pas nécessairement à des changements majeurs des quantités de grains achetées et consommées [5], [6].

D'un point de vue économique, un rôle important du stockage des céréales est de réguler les fluctuations dans l'approvisionnement du marché d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre, en récupérant l'excédent des productions saisonnières qui ont été fructueuses. Cela permet d'alimenter, par le biais de ce marché, les populations durant les périodes où les productions sont les plus faibles. Grâce à ce procédé, l'approvisionnement des populations est garanti ; il permet aussi de lisser les fluctuations des prix du marché. L'objectif de stabiliser les prix des denrées de base est l'une des principales raisons pour lesquelles les gouvernements tentent d'influencer stockage et gestion des stocks.

Le grain n'est pas stocké dans le seul but de régulariser les prix sur le marché, car tout dépend du niveau des volumes à stocker et de l'activité de l'entité qui stocke : pour les petits agriculteurs, le stockage du grain est une sorte d'assurance dans l'approvisionnement alimentaire de leur foyer et de leurs productions animales ; en ce qui concerne les grandes firmes agricoles ou les coopératives, les entrepôts de grains ont pour objectif de tirer le maximum de bénéfices et réguler à leurs profit les cours de céréales au sein du marché international (on peut, dans certains cas, parler de comportements spéculatifs). Pour les industriels, le stockage rentre dans une démarche de pérennisation de leurs activités pour leur permettre de conserver leurs places sur le marché ; les gouvernements eux, voient dans le stockage des céréales une voie de préservation de la sécurité alimentaire nationale, primordiale à la stabilité politique [6]. Il est essentiel de rappeler que, pour bon nombre de pays, la réserve céréalière nationale est considérée comme étant un élément indispensable à la sécurité de l'État [5].

Depuis les origines de l'agriculture, les récoltes agricoles stockées, destinées à la consommation humaine peuvent être mises en péril en raison d'incidences causées par des ravageurs en tout genre. Parmi ces ravageurs, on identifie des animaux nuisibles (les insectes, les acariens, les nématodes, les rongeurs, les limaces, les escargots et les oiseaux), des agents pathogènes de plantes (virus, bactéries, champignons) et de mauvaises herbes, collectivement appelés parasites des produits végétaux [7]. Face à ces dangers, les agriculteurs ont cherché et mis en œuvre différentes méthodes et outils afin de réduire les risques de pertes causées par ces influences parasites, et si possible de les éradiquer : la démarche générale consiste, du champ, au silo et à l'utilisation, à détecter au plus tôt, la présence de ces parasites et à les traiter essentiellement par l'application de produits chimiques.

Les stocks de céréales ne sont pas en marge de ces phénomènes puisqu'ils subissent les attaques d'insectes et la présence d'animaux rongeurs et autres pigeons. Les pertes provoquées par ces parasites, durant le stockage, sont estimées entre 10 et 30 %, en fonction du type de produit et de la région de stockage concernée. Les pertes en denrées sont non seulement quantitatives mais aussi qualitatives et nutritionnelles [8]. Parmi les ravageurs, les insectes sont sans doute les plus redoutables notamment lorsque qu'un certain nombre de facteurs sont réunis [9]. Il est difficile de donner des chiffres exacts sur les pertes causées par les insectes mais cela peut dépasser les 10% de la récolte (perte de la valeur sur le marché). Les insectes, en plus de consommer le grain, provoquent notamment des montées de température et de moisissures en raison de leurs activités métaboliques, conduisant au développement de points chauds et de microflore dans le grain [10]. Le grain fortement infesté est non seulement inconsommable mais perd aussi sa capacité germinative.

La plupart des agriculteurs et organismes stockeurs ont généralement recours à plusieurs insecticides que l'on peut trouver sur le marché. Cette méthode a montré des limites quant à la lutte contre les insectes qui deviennent résistants aux traitements. Il faut aussi évoquer les nombreux problèmes qu'elle engendre : dépenses considérables en matière d'insecticides et de main-d'œuvre, diminution de

la qualité des produits à cause des résidus, pollution de l'environnement et, rappelons-le, le développement par les insectes d'une résistance aux insecticides. De nouvelles exigences plus écologiques ont vu le jour dans les années 80, prônant une utilisation modérée des produits chimiques et le développement d'une méthodologie dans la lutte contre les nuisibles de tout type. C'est la lutte dite intégrée ou Integrated Pest Management (IPM¹) en anglais [12]. Cette méthode confronte l'intelligence de l'observation ainsi que l'imagination de l'homme et le potentiel de prolifération et d'adaptation de l'insecte [13].

En résumé, la surveillance de la qualité du grain en stock est un enjeu mondial très important qui mérite le développement de nouvelles techniques et technologies qui garantiront la parfaite maîtrise du stockage et qui permettront la réduction des pertes, la réduction de l'usage des insecticides et l'assurance d'une qualité meilleure. C'est dans ce contexte qu'a été lancé le projet ECOSILO, dans lequel viennent s'inscrire nos contributions sur la surveillance qualité. Ce projet associe un consortium d'industriels, de laboratoires de recherche et d'organismes stockeurs céréaliers répartis sur plusieurs régions, représentatives de la production céréalière française. Il a comme objectif **de développer une alternative au traitement systématique des céréales stockées dans les silos, en limitant le recours aux pesticides par un traitement "raisonné" en fonction de seuils d'intervention.** La solution technologique proposée est basée sur une approche innovante de gestion du risque d'infestation et de déclenchement du traitement au bon moment et au bon endroit. Cette approche nécessite le développement de nouveaux produits et services qui seront créateurs de nouvelles activités pour les entreprises industrielles partenaires du projet.

Cette nouvelle stratégie de protection raisonnée dans les silos doit permettre de réduire considérablement (de l'ordre de 90%) la consommation de produits phytosanitaires dans la phase de stockage des céréales et la quantité de grains contenant des résidus (teneur beaucoup plus basse qu'aujourd'hui). Ceci au bénéfice de la filière céréalière qui disposera de solutions efficaces pour, premièrement, faire face à l'évolution réglementaire, deuxièmement, répondre à la demande croissante des clients industriels et des consommateurs sensibles à la qualité sanitaire des produits alimentaires, et, enfin, se différencier de la concurrence sur les marchés exports.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ECOSILO soutenu par le FUI-AAP2012 et labellisé par les pôles de compétitivité Agrimip, Vitagora et Qualiméditerranée.

La démarche ECOSILO demande un suivi et un contrôle permanent de la santé du grain entreposé. Le LAAS-CNRS est en cela impliqué depuis bien longtemps dans le monitoring des systèmes, que ce soit

¹ IPM (Integrated Pest Management) : La prise en compte de toutes les techniques de lutte disponibles et l'intégration des mesures appropriées qui découragent le développement des populations de ravageurs et maintiennent les pesticides et autres interventions à des niveaux économiquement justifiés et réduisent ou limitent au minimum les risques pour la santé humaine et l'environnement [11].

pour le suivi du comportement des personnes âgées, le suivi et le contrôle de la santé des structures, ou le suivi et le contrôle de la santé environnementale [2]–[4], [14].

Plusieurs équipes dans le monde se sont intéressées à ce sujet et ont proposé des améliorations méthodologiques et techniques : l'intérêt de notre approche est double, à savoir : **innover sur les appareillages de mesures, sur la détection des anomalies, et concevoir un système complet de surveillance jusqu'au stade du prototypage.**

Sur le plan de la réduction de l'usage des insecticides, l'objectif est de contribuer à développer, avec l'appui des propositions de la société AB7 innovation ainsi que les autres partenaires, une alternative innovante de protection intégrée et optimisée, en remplacement des traitements systématiques actuellement utilisés. La stratégie d'ensemble repose sur la mise en place d'une détection de la présence des insectes « au plus tôt » et l'application d'un traitement limité « au bon moment et au bon endroit », au-delà d'un seuil de risque déterminé par le système de surveillance et d'aide à la décision.

Les approches proposées dans cette thèse reposent, d'une part, sur les travaux récents effectués dans le domaine de l'entomologie, notamment ceux effectués par l'INRA, afin de mieux connaître le comportement des insectes dans les entrepôts, et, d'autre part, sur de nouvelles techniques de surveillance multi-capteurs que nous développerons et mettrons en œuvre dans ce travail. Nous nous intéresserons en particulier à :

- **L'élaboration d'un système de mesure multi-sensoriel** basé sur des capteurs répartis afin de surveiller les céréales et de détecter d'une manière précoce les insectes. Pour cela, il sera nécessaire d'établir des modèles comportementaux de l'évolution des insectes en fonction des paramètres ambiants et des modèles thermiques liés aux silos de stockage ;
- **L'élaboration d'un outil d'aide à la décision** et de contrôle-commande ;
- **Le déclenchement d'un traitement préventif** à partir d'un seuil de risque prédéfini, uniquement sur le lit de grain superficiel exposé aux insectes ;
- Le prototypage du système en laboratoire ;
- Les tests et validation des modèles/algorithmes sur des données réelles, en termes de performance de prédiction.

Le manuscrit est organisé en quatre parties :

Le premier chapitre tracera un panorama des problématiques liées au stockage du grain, dressera un historique sur les méthodes et pratiques usuelles employées et présentera les systèmes développés au cours de ces dernières décennies dans la lutte contre l'infestation des entrepôts de céréales. Cette partie servira d'état des lieux des pratiques actuelles et nous permettra d'aiguiller notre champ d'action dans le développement d'un système de suivi fiable et adapté dans le maintien de la santé du grain. Enfin, nous présenterons le projet **ECOSILO qui s'inscrit dans une démarche écologique, visant à la**

réduction des pertes liées au stockage, à la limitation de l'usage des insecticides et donc à la préservation de la qualité des grains stockés. Le concept global ECOSILO se fonde sur l'utilisation d'attractifs, pour, en cas d'infestations d'insectes, réduire les volumes touchés et permettre des traitements moindres et localisés. Pour ce faire, l'entreprise AB7 qui porte le projet propose une technologie originale de « polymères actifs » qui sont des polymères chargés d'attractifs ou d'insecticides qu'ils délivrent progressivement.

Dans le second chapitre, nous présenterons la démarche adoptée dans la conception du système nommé SILOCARE pour la surveillance des entrepôts de grains. Nous donnerons une description fonctionnelle de l'architecture du système, une architecture modulaire qui répond aux problématiques soulevées dans le premier chapitre. En dernier lieu, nous exposerons la manière avec laquelle nous proposons d'assurer la surveillance du développement des insectes au sein du grain : **cette surveillance repose sur trois axes principaux de progressions : la prédiction de la présence des insectes, la détection réelle de leur présence et l'actionnement automatique pour le traitement in-situ de l'infestation détectée.** L'impact de ces propositions peut être d'autant plus important que les zones infectées seront réduites par l'action des attractifs, autre volet du projet ECOSILO. Enfin, nous présenterons le cahier des charges qui rassemble toutes les exigences nécessaires à la réalisation du système complet SILOCARE que nous proposons et dont l'originalité sera de coupler aux dispositifs de mesures un volet prédictif basé sur l'implémentation d'un modèle biologique estimant la dynamique de croissance des insectes et anticipant donc les risques d'infestations.

La mise en œuvre et l'expérimentation du système sur site réel seront présentées dans le Chapitre III. Nous décrirons toutes les étapes de notre démarche qui nous a conduits à proposer différentes versions matérielles du système de surveillance : SILOTEST 1 pour la surveillance des parties hautes du tas de grain, SILOTEST 2, pour la détection d'insectes au moment de l'ensilage, SILOTEST 3 pour une détection sur toute la hauteur du tas de grain. Par la suite, nous ferons le point sur les technologies utilisées qui sont : l'architecture informatique de notre système complet de surveillance SILOCARE ; les technologies des différents capteurs choisis que nous avons conçus ou simplement approvisionnés ; le modèle biologique et tous les algorithmes développés qui vont servir à gérer les différents capteurs et modèles, cités précédemment.

Le Chapitre IV sera dédié à la présentation des résultats obtenus et à l'évaluation du système développé. Cette démarche d'évaluation a été organisée en trois étapes : nous avons d'abord mis au point et vérifié le caractère fonctionnel et les performances en laboratoire de nos prototypes ; nous avons ensuite exploité avec l'appui des équipes d'AB7, un mini silo de un mètre cube pour évaluer les performances de nos capteurs et faire une première approche de la mise en œuvre du projet complet ECOSILO, c'est-à-dire le couplage avec la diffusion d'attractifs. Finalement, durant plusieurs mois, nous avons expérimenté l'ensemble SILOCARE dans une cellule du silo de notre partenaire

ARTERRIS, située à Lavaur dans le Tarn. Dans un premier temps, nous exposerons en détail les différentes données recueillies par le système ainsi que les résultats du traitement qui en découlent. Nous analyserons ensuite les résultats pour répondre aux questions essentielles : Quelle est la place utile des démarches préventives proposées ? Quels sont les modes de détections les plus précoces, les plus efficaces ? Quels sont les types d'implémentations sur site? Peut-on imaginer un système de surveillance sans faute délivrant un certificat de bonne santé ? Enfin, nous ouvrirons quelques perspectives d'applications industrielles et proposerons de nouvelles étapes de recherche pour améliorer et fiabiliser davantage notre système complet SILOCARE de suivi et de surveillance des entrepôts de grains.

En conclusion, nous rappellerons brièvement les travaux réalisés durant ces trois années de thèse et mettrons en évidence les apports mais également les insuffisances constatés, que cela soit dans la mise en place du système ou dans la conception même. Nous terminerons enfin ce mémoire de thèse par l'exposé d'une vision personnelle quant au projet réalisé et ses perspectives de développement.

Chapitre I : Problématique de la surveillance du stockage de grain

1. Introduction

Le terme céréales désigne un ensemble de plantes qui sont principalement cultivées pour leurs grains riches en amidon et, très secondairement, pour les fourrages lorsqu'elles sont récoltées en vert, c'est-à-dire avant la maturation des grains. Parvenus à maturité, les grains sont principalement – pour les deux tiers de la production mondiale – consommés directement par les hommes [15].

L'histoire nous apprend que durant plusieurs milliers d'années, les sociétés paléolithiques se sont alimentées par le biais de la chasse, de la pêche et de la cueillette ; ce sont les premières sociétés agricoles sédentaires qui, suite à la révolution néolithique, ont introduit la mise en semence du grain, ont développé des savoir-faire novateurs en matière de domestication des plantes. Ces techniques nouvelles ont donné naissance à un processus d'aménagement des cultures : l'agriculture, et constitué la base économique de la « civilisation » : C'est sur cette base, qui a regroupé les hommes, qu'ont pu se développer des sociétés qui à leur tour ont impulsé des domaines tels que la littérature, les mathématiques, l'organisation politique, et autres [16]. On apprend grâce à plusieurs études, principalement menées au XX^e siècle, que le développement de l'agriculture est à l'origine de la sédentarisation des peuples et de la création de regroupements humains, 10.000 ans av. J.-C [17].

La culture des céréales fut la première pratique agricole (culture du blé amidonnier), apportant un aliment très apprécié, car il pouvait être fourni hors saison grâce au stockage : les grains stockés ont ainsi pu constituer l'une des premières, sinon la première forme de monnaie [18]. La création d'une réserve monétaire, indispensable à l'organisation de la vie dans la cité et au développement des premiers groupements, a appuyé la pratique du stockage des grains. Avec l'accroissement des populations, de leurs regroupements et de la structuration de la cité, les besoins de produire plus et de stocker se sont imposés sur le long terme, comme une stratégie de développement :

- la céréale est un produit durable qui a des caractéristiques permettant son stockage sur de longues périodes, fonction des conditions de ce stockage,
- elle peut assurer une indépendance des groupements humains, les uns par rapport aux autres.

En pratique, les exigences générales sont :

- d'assurer la pérennité du grain pour pouvoir offrir une alimentation humaine et animale saine ;
- de conserver la semence de saison en saison pour assurer les récoltes ;
- d'organiser sa commercialisation.

Le grain stocké n'est pas à l'abri de toute dégradation et est susceptible de subir des altérations de ses aptitudes à la conservation et de ses qualités alimentaires et sanitaires. Le stockage et la conservation sont donc depuis toujours des composantes essentielles de l'activité humaine : des études archéologiques, historiques et ethnologiques, ont identifié différents types de structures de stockage à moyen et long terme qui ont été classifiés et présentés par D. MEEKS et D. GARCI [19] dans la Figure 1

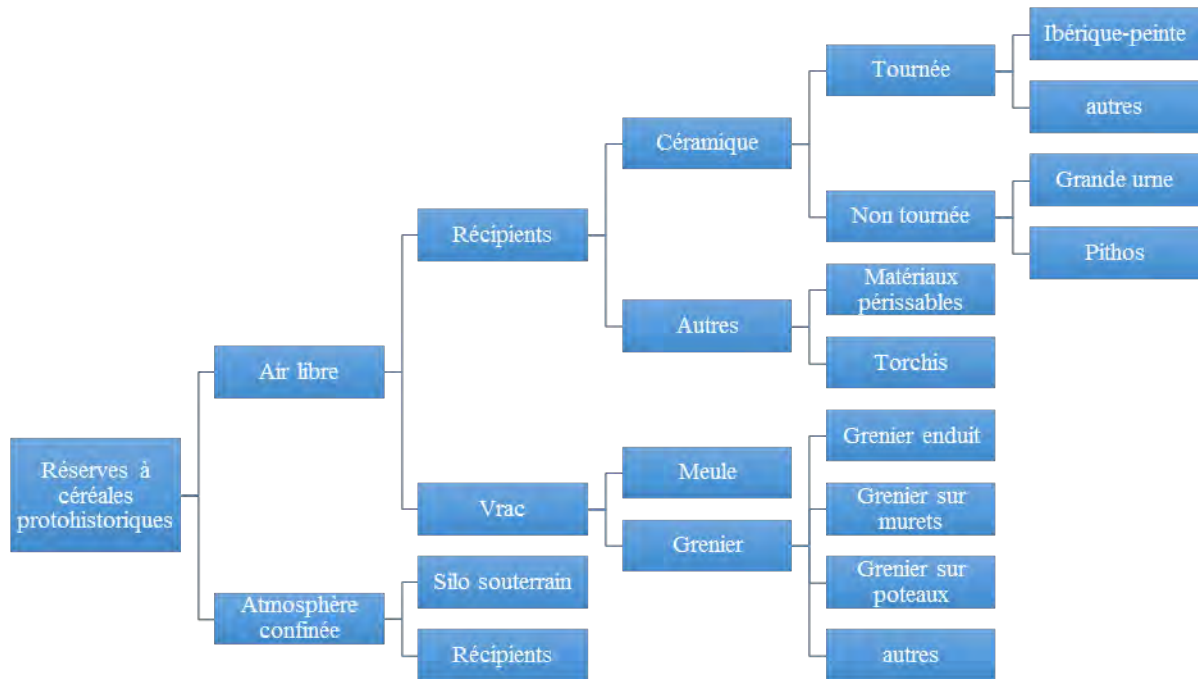


Figure 1 : Arbre taxinomique des réserves à céréales en Méditerranée occidentale

En résumé, les réserves de céréales constituèrent un élément vital à la survie des groupes humains d'hier mais aussi une ressource primordiale au fonctionnement du monde d'aujourd'hui ; elles concernent notamment ces domaines essentiels : l'alimentation (conservation des aliments à court et long termes pour les Hommes comme pour les animaux), l'agriculture (préservation des semences), l'économie (produits destinés au commerce national et international,) et la politique (stabilité interne, moyen de pression,...) [19]. La production d'une part, le stockage et la commercialisation d'autre part sont les bases techniques d'une organisation devenue mondiale.

Notre problématique est celle du stockage vu sous l'angle des technologies de surveillance. Dans ce premier chapitre, nous allons brièvement rappeler les enjeux économiques et présenter les risques encourus par le grain pendant son stockage. Nous verrons ensuite comment les technologies de surveillance ont pris une place importante pour réduire les pertes et assurer une bonne gestion des échanges commerciaux. Nous en verrons les limites et les besoins nouveaux afin d'introduire notre contribution : **imaginer et prototyper un système de surveillance, appelé SILOCARE, qui assure le suivi de la santé du grain tout au long de son stockage.**

2. Les céréales dans l'économie mondiale et française

La céréale demeure, encore de nos jours, la première ressource protéique et énergétique de la population mondiale mais également en ce qui concerne la production animale. Les terres réservées à la culture céréalière représentent près de 690 millions d'hectares dans le monde, soit plus de 15% de la surface agricole mondiale [20]. Cette culture permet des récoltes (Figure 2) qui s'élèvent à 2 522 millions de tonnes (année 2014) [21]. Les récoltes sont composées principalement de maïs, de blé, de riz, d'orge et de sorgho.

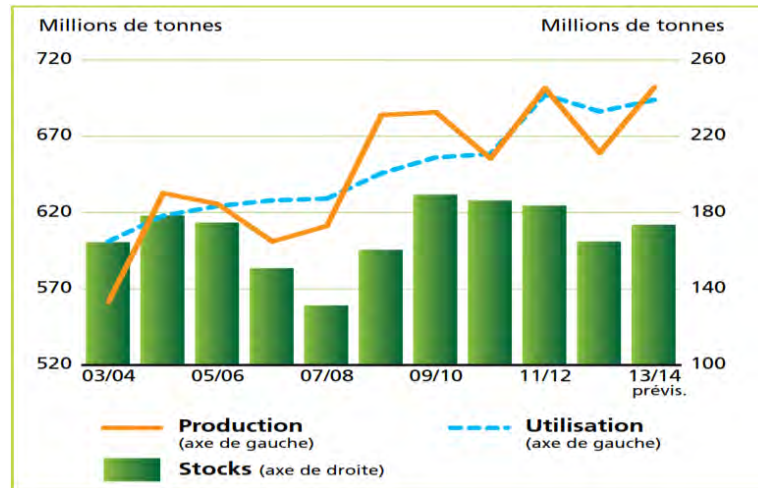


Figure 2 : Production, utilisation et stockage des céréales [22]

L'Union Européenne occupe la troisième place dans la production mondiale des céréales (302,9 Mt), précédée par les États-Unis (408 Mt) et la Chine (490,6 Mt) [22].

La France à elle seule, produit 67,3 Mt de céréales (Figure 4) dont 35 Mt de blé [23], une production lui permettant de réaliser le quart de la production de l'Union Européenne et de se hisser au 5ème rang mondial des producteurs de blé entre la Russie et le Canada. Avec ces 32,9 Mt de céréales exportées par an dont 17,2 Mt de blé (le blé est la céréale la plus échangée au monde), la France exporte tous les ans plus de 45 % de sa récolte et se place ainsi au second rang des exportateurs mondiaux [23] (FranceAgriMer). La Figure 3 récapitule le classement des 6 plus grands exportateurs de céréales.

La Figure 4 présente de manière non exhaustive les différents types de céréales produites en France.

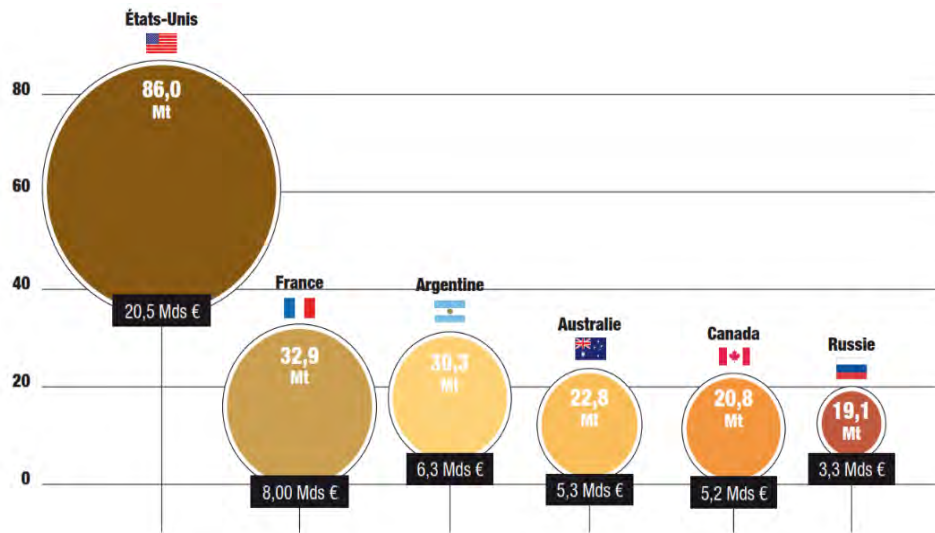


Figure 3 : Les 6 premiers exportateurs de céréales (incluant le riz) en 2011 [24]

Les exportations mondiales de céréales représentaient, en 2011, 120 milliards de dollars pour 350 millions de tonnes. Les exportations céréalières françaises ont rapporté 8,4 milliards d'euros. Les céréales en vrac et produits de la première transformation des grains ont dégagé quant à eux un excédent de 10,05 milliards d'euros en 2013.

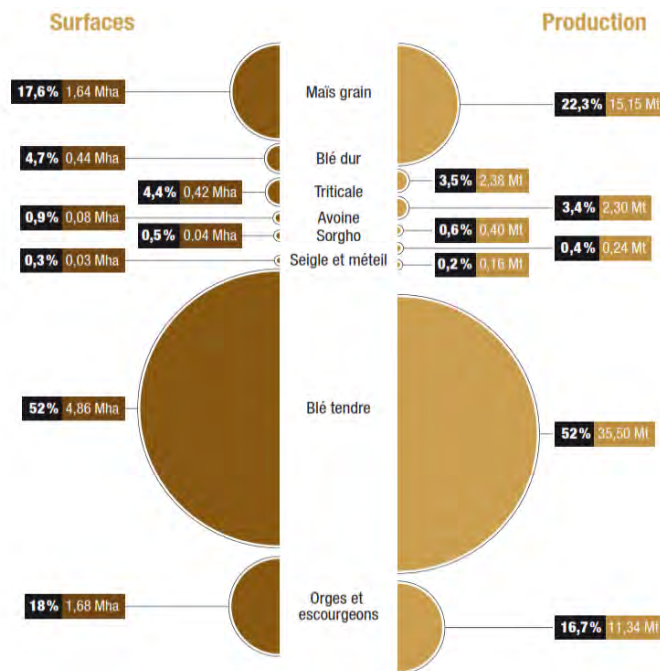


Figure 4 : La production céréalière (hors riz) en France (2012) [24]

Nous constatons suite à ces chiffres, l'importance économique de la production et du commerce des céréales pour un pays comme la France : cette évidence motive l'intérêt d'investir encore davantage dans cette filière si fructueuse. Pour bien organiser toutes les chaînes commerciales de céréales, que cela soit dans la distribution sur le marché national, ou sur le marché international, le stockage des

céréales dans des silos à la ferme, dans les silos de condensation ou dans les silos portuaires est indispensable. L'entreposage des grains dans ces bâtiments n'est pas une chose simple. Il demande beaucoup d'organisation et surtout beaucoup de vigilance afin de préserver et la qualité du grain et l'environnement de ce stockage.

3. Les problèmes relatifs au stockage des céréales

La bonne conservation des grains est donc un enjeu majeur : parmi les problèmes rencontrés, il y a le problème de la nature même du grain : Le grain étant un organisme vivant, il a une activité respiratoire ; au cours du processus de respiration, l'amidon et l'oxygène produisent aussi bien du gaz carbonique que de l'eau et de la chaleur [25]. **Un grain mal conservé va spontanément se réchauffer, ce qui favorise dans un premier temps, le développement des insectes. C'est le mécanisme de l'infestation : les insectes consomment le grain et provoquent des montées de température, en raison de leurs activités métaboliques, accélérant ce réchauffement.**

Lorsque le réchauffement atteint un certain seuil, on voit apparaître, en présence d'humidité, le mécanisme de croissance des moisissures [10]. Ces phénomènes d'auto-échauffements rendent possibles des mécanismes extrêmement dangereux jusqu'à l'auto-inflammation pour certains types de grains : les oléagineux. En présence de poussières produites par le frottement des grains entre eux, exposées à une température ambiante trop élevée, le mélange poussière/oxygène de l'air brûle et provoque des explosions. La France a été frappée par plusieurs accidents survenus dans des silos de stockage de céréales, telles que les catastrophes de METZ (octobre 1982) et de BALYE (août 1997) qui ont causé respectivement, la mort de 12 et 11 victimes[25], [26]. Suite à ces incidents, les arrêtés ministériels du 11 août 1983, suivi par celui du 29 juillet 1998 ont été mis en place afin de réglementer les normes de sécurité des bâtiments d'entreposage. Ces installations de stockage ont été soumises à une autorisation, au titre de la législation *Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE²)* qui relève actuellement de l'application de l'arrêté ministériel du 29 mars 2004 [27].

D'autres facteurs provoquent des altérations des propriétés alimentaires ou sanitaires des céréales entreposées, représentent un danger pour la santé des consommateurs et une perte considérable dans la valeur économique du grain [28]. Les dangers potentiels pouvant affecter la qualité du grain stocké sont au nombre de trois : physique (corps étrangers, allergènes, débris ...), chimique (métaux lourds, résidus insecticides de stockage, les résidus de détergents et produit de désinfection, les dioxines,...) et biologique (les insectes et les acariens, les mycotoxines, les moisissures, les rongeurs leurs traces macroscopiques...) [28]. Cette question de l'hygiène des céréales comme celle de tous les aliments destinés à la consommation, doit être obligatoirement parfaitement assurée. C'est pourquoi elle est

² ICPE: Les installations et usines susceptibles de générer des risques ou des dangers sont soumises à une législation et une réglementation particulières, relatives à ce que l'on appelle "les installations classées pour la protection de l'environnement

encadrée par la réglementation européenne qui s'emploie à la faire respecter (le règlement 852/2004 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires) [28].

3.1. L'altération de la qualité des grains stockés

3.1.1 L'altération physique

L'altération physique représentée par la présence des différentes impuretés, débris et grains endommagés ou même de grains et graines d'espèce autres que celles stockées. Plusieurs facteurs sont à l'origine de la présence des corps étrangers : la perte d'objets par les opérateurs dans le stock, la détérioration du matériel de manutention ou le mauvais nettoyage des locaux de stockage. Ces corps étrangers peuvent causer des nuisances au consommateur final comme la cassure des dents dans le cas de matières dures, provocation d'allergies dans le cas d'une altération par une matière allergène.

3.1.2 L'altération chimique

Le grain stocké peut être contaminé par des substances chimiques néfastes à la santé humaine et animale. La contamination chimique se résume par la présence de métaux lourds, de résidus de produits phytosanitaires ou de produits de désinfection. Les métaux lourds sont des éléments métalliques naturels dont la masse volumique est supérieure à 5 g/cm³ présents naturellement dans l'environnement ou provenant des activités humaines et industrielles. Ces éléments de par leur capacité d'accumulation, se trouvent dans notre alimentation [29]. Les pesticides par leur nature même, sont toxiques. Fréquemment, leurs cibles biochimiques sont communes à la fois à l'organisme contre lequel le pesticide est conçu pour agir et à l'organisme humain [30]. Les résidus chimiques présents dans le grain sont la cause de plusieurs problèmes sanitaires, notamment des problèmes neurologiques [30], [31].

3.1.3 L'altération biologique

Les facteurs biologiques contaminants le grain sont nombreux. Nous ne citerons ici que les principaux.

Les rongeurs font partie des ravageurs les plus répandus. Dans un certain nombre de pays, ils provoquent autant, sinon plus de dégâts que les insectes nuisibles [32]. Les pertes réelles provoquées par les rongeurs sont beaucoup plus élevées que le montant des produits consommés par ces animaux, car ils contaminent la marchandise stockée avec l'urine, les matières fécales, les poils et des agents pathogènes. Comme il est difficile, voire impossible, d'enlever la souillure produite par les rongeurs dans le grain, les lots infestés doivent souvent être signalés impropres à la consommation humaine ou radiés comme pertes totales. Il y a environ 50 maladies transmissibles à l'homme par les rongeurs, parmi lesquelles la typhoïde, la paratyphoïde, la trichinose, la gale, la peste et les fièvres hémorragiques comme le virus Ebola [32], [33].

La contamination par les moisissures (champignons), cause à la fois des dégâts quantitatifs et qualitatifs dans les stocks de grains, certaines moisissures développant des métabolites toxiques, les mycotoxines, qui sont a priori dangereuses pour la santé humaine et animale, provoquant des maladies connues sous le nom de mycotoxicose [34].

Les insectes ravageurs constituent la cible de nos travaux de thèse, sont en effet responsables des pertes les plus importantes et parfois même de la perte totale des céréales entreposées [35]. Dans la suite de ce manuscrit, nous détaillerons donc cette problématique de l'infestation des entrepôts par les insectes ravageurs (insect pests) et rappellerons l'essentiel des méthodes couramment utilisées pour lutter contre ces ravageurs avant de présenter les objectifs de notre travail.

3.2. Les problèmes de conservation des grains posés par les infestations d'insectes

Certains insectes vivent de la consommation du grain : au stade larvaire, ils se développent à l'intérieur même du grain : ils sont alors invisibles ; une fois adultes, en raison de leur petite taille, ils ne sont pas facilement détectables : lorsque l'on constate la présence d'insectes dans un entrepôt de céréales, cela indique généralement que le stock est déjà fortement infesté. De plus, leur faculté à se multiplier très rapidement leur donne la capacité d'occasionner des pertes considérables [32]. Dans le cas où des conditions favorables sont réunies, notamment une bonne température, le temps de développement (cycle de développement) de certains insectes peut être compris entre 3 et 4 semaines. La température idéale pour le développement de ces insectes est de l'ordre de 25 à 30 °C. A 15 °C, le temps de développement est significativement retardé (entre 4 et 7 mois). A des températures en dessous de 10 °C ou au-delà de 35°C, le cycle de développement n'atteint pas son terme et le taux de mortalité devient alors considérable [36], [37].

Outre l'influence de la température, le développement dépend également de l'humidité du grain. Sur des céréales à moins de 10 % d'humidité une forte mortalité est enregistrée [37], [38]. La Figure 5 ci-dessus illustre le domaine (température/humidité) où le développement des insectes ainsi que celui d'autres parasites est favorisé.

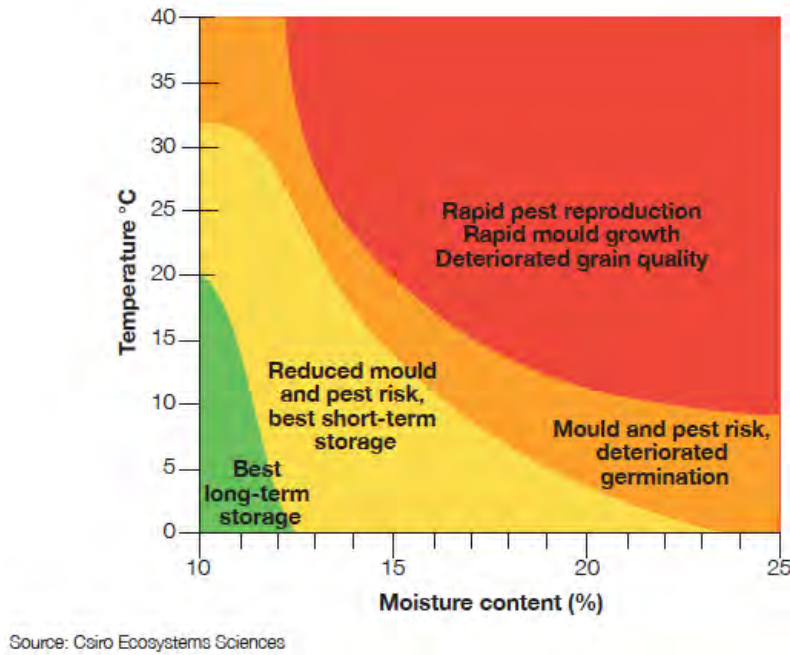


Figure 5 : Développement des parasites dans les entrepôts de grain en fonction de la température et de l'humidité

3.2.1 Cas des insectes ravageurs

Les plus grands ravageurs parmi les espèces d'insectes, sont les coléoptères, les lépidoptères et les acariens.

Les insectes ravageurs, sont en général classés en deux groupes : le premier groupe, celui des ravageurs primaires, qui englobe les insectes pouvant détériorer le grain sain ; le deuxième groupe, celui des ravageurs secondaires qui ne peuvent atteindre le grain que lorsqu'il est déjà cassé ou percé, suite à une dégradation due au processus de stockage ou à une attaque des ravageurs primaires, leur ouvrant alors une porte d'accès [39]. Ainsi, les ravageurs primaires comme les *charançons* (du grain et du riz) et le capucin, en plus de leur propre consommation de céréales, donnent accès aux ravageurs secondaires comme le *tribolium*, afin d'accroître la détérioration [40], [41].



Figure 6 : Charançon de riz (*Sitophilus oryzae*)



Figure 7 : Tribolium (*Tribolium castaneum*)

En France, le charançon est l'insecte le plus présent et causant le plus de dégâts.

3.2.2 Le développement des insectes

Le charançon est un insecte faisant partie de la famille des curculionidés [42]. Son rostre plus ou moins prononcé, (trois fois plus long que la tête) le rend aisément reconnaissable. Comme la plupart des insectes, il est de très petite taille. L'adulte mesure (rostre compris) de 2,5 à 4,5 mm et est d'une couleur marron foncé à noirâtre. La larve est longue de 2,5 à 3 mm, de couleur blanche, de forme subcirculaire. Les larves se développent à l'intérieur de la graine. La femelle a une fécondité de 300 œufs et une longévité de six à sept mois [41]. A l'aide de son rostre, quelques jours après l'accouplement et pendant quatre mois, la femelle fore un trou dans le grain, y dépose un œuf puis rebouche le trou par du mucilage (bouchon gélatineux) qui durcira à l'air. Dès qu'elle apparaît, la larve creuse au travers du grain une galerie qu'elle va élargir au fur et à mesure de sa croissance. Elle se transformera ensuite en nymphe dans la loge qu'elle aura créée, puis deviendra après une dernière mue, un adulte qui sortira alors du grain pour se reproduire (voir Figure 8). Au cours de ce développement qui est totalement invisible, une bonne partie du grain aura été consommée et ce n'est qu'au moment de l'émergence de l'adulte que le dégât devient visible [35], [41]. Il restera alors un grain vidé, présentant le trou de sortie de l'adulte et contenant les déjections du développement larvaire (voir Figure 9)



Figure 8 : Cycle de développement du charançon : œuf, larve, nymphe et adulte



Figure 9 : Grains vidés par le charançon

3.2.3 Les dégâts causés par les insectes

Les céréales ne sont en général récoltées qu'une seule fois dans l'année, leur stockage pour des périodes plus ou moins importantes étant une étape essentielle afin d'assurer leur disponibilité sur le marché. Les insectes afin de survivre, nous disputent les récoltes conservées et font des dégâts très importants dans les denrées entreposées.

La moisson du grain est en général faite en été. Avant d'arriver dans les grands locaux de stockages, le grain, peut être provisoirement stocké dans les fermes puis mis en ensilage. Le grain peut être déjà infecté au champ et, par manque de précautions, de moyens de surveillance ou par manque de compétences et de connaissances, il peut être mal conservé en ferme, favorisant ainsi sa de nouvelles

contaminations par les insectes ravageurs. Une fois dans les grands entrepôts, en fonction des conditions climatiques en règle générale favorables au développement des insectes, les larves ou même les insectes adultes, initialement présents dans le grain, vont progressivement se développer, se multiplier et infester tout le stock : ils infligent alors leurs dégâts sur les produits stockés, principalement par leur propre consommation. Certaines espèces se nourrissent de l'endosperme, causant une perte de poids et de qualité, tandis que d'autres espèces se nourrissent du germe, ce qui entraîne une perte germinative dans le produit stocké. Ainsi, en raison des dommages causés par les insectes, les grains perdent de leur valeur dans le marché. Ces ravageurs de stockage sont en mesure de s'accroître considérablement, en nombre dans un temps relativement court. À un stade précoce de développement, la croissance de la population suit une loi « exponentielle » (Figure 10), où la croissance du nombre d'insectes à un instant donné est bien décrite par l'équation : $N_t = N_0 e^{rt}$

Où :

- N_t représente le nombre d'insectes à l'instant t ;
- N_0 est le nombre d'insectes initialement présents dans le stock ;
- r est la portée (progéniture) de l'insecte.

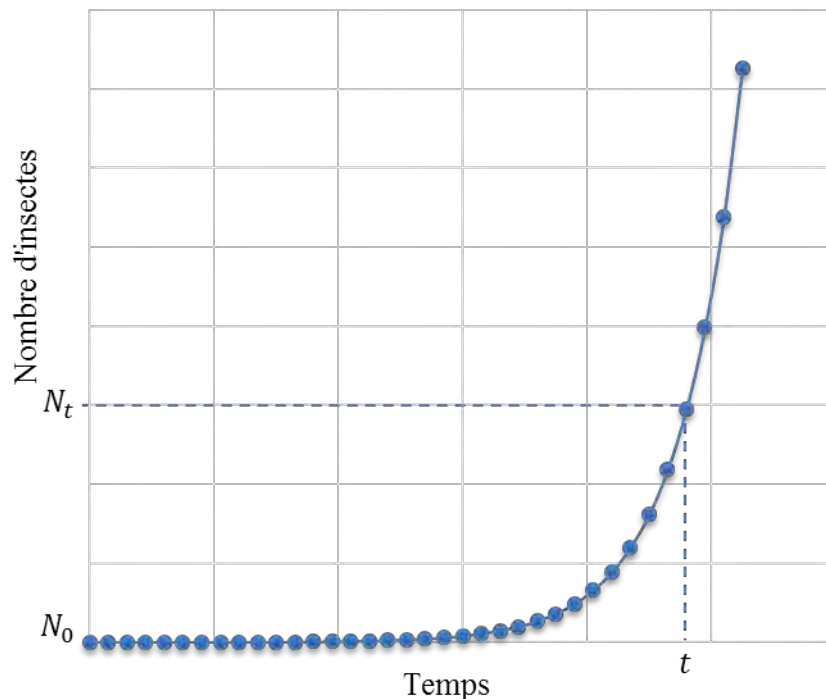


Figure 10 : Le développement exponentiel théorique de la population des insectes

Il a été montré dans la littérature qu'un couple d'insectes peut avoir une progéniture de 190 000 insectes sur une durée de six mois [43].

En plus de la consommation du produit stocké, les insectes ravageurs contaminent le grain par leurs cadavres et leur propre existence dans le produit, ce qui n'est commercialement pas acceptable. Les

dommages causés par les insectes nuisibles, entraînent l'apparition et de développement de moisissures produisant à leur tour des mycotoxines dangereuses pour la santé humaine et animale. **La présence conjointe d'insectes et de moisissures augmente de manière significative la température du grain provoquant des points chauds, stimulant ainsi la détérioration des semences.**

Aux prémices de l'agriculture, les hommes ont subis les ravages engendrés par ses nuisibles sans chercher à les contrôler mais ont progressivement appris à protéger leurs cultures contre les ravageurs en utilisant différentes approches basées sur des phénomènes mécaniques, physiques, biologiques ou culturels. Actuellement, face aux agressions et ravages que nous venons de décrire, les agriculteurs et les scientifiques sont associés dans la recherche de nouvelles méthodes et outils afin de mieux préserver leurs récoltes.

4. Les différentes approches de la lutte contre les insectes

4.1. La lutte physique

La lutte physique contre les insectes ravageurs a commencé simplement par le ramassage des insectes à la main afin de les écraser. Les nouvelles techniques physiques et mécaniques impliquent une participation humaine directe ou indirecte et leur degré de complexité varie du simple ramassage à la main, à l'utilisation de systèmes plus sophistiqués. Dans certaines situations, la technique la plus simple peut s'avérer la plus efficace.

1.1.1. Le séchage

Comme nous l'avons vu précédemment, l'un des facteurs physiologiques le plus critique dans le bon stockage des grains, est l'hygrométrie du produit stocké. Une hygrométrie élevée favorise l'auto-réchauffement du grain et le développement de différents parasites. Les nouvelles récoltes ont souvent une teneur en eau légèrement élevée, qui nécessite une opération de séchage. Plusieurs méthodes de séchage des grains existent, allant du simple séchage sous le soleil [44] aux systèmes avancés de séchoir à flux continu [45]–[47].

1.1.2. Le piégeage

Le piégeage est une technique très répandue : elle est surtout utilisée pour le dépistage d'infestations des entrepôts de grain mais aussi pour réduire les populations d'insectes. Cette technique se révèle plus efficace pour lutter contre les insectes volants. Il existe de multiples types de pièges à insectes qui sont disponibles sur le marché, afin de répondre aux besoins selon la quantité de grain entreposé et l'espèce à surveiller.

1.1.1.1. Les Pièges passifs

Ils existent sous deux formes ; sous forme tubulaire muni d'une extrémité pointue pour faciliter son insertion dans le grain, composé en général de trois parties et d'un tube principal, le piège à insectes, doté de perforations équidistantes de 2 mm, dans le but d'entraîner la chute des insectes, qui une fois piégés, sont dans l'incapacité d'en réchapper (Figure 11). Cela, est dû à la forme conique détachable du récipient qui constitue la dernière partie du piège. Les pièges doivent être retirés du tas de grains et inspectés de façon régulière dans le but de déterminer le nombre et le type exact d'insectes capturés. L'efficacité de ce genre de pièges, réside dans le fait que les insectes préfèrent les endroits les plus aérés [48]. Le piège est enfoncé verticalement dans le tas de grains jusqu'à ce qu'il ne reste que la partie supérieure en dehors du grain. Sur ce même principe et sous forme conique, les pièges coniques sont aussi utilisés pour la capture des insectes actifs sur la surface du grain.



Figure 11 : Pièges à insectes

1.1.1.2. Les pièges attractifs (phéromones sexuels, attractifs alimentaires)

Sont des pièges tubes qui utilisent un attractif naturel ou de synthèse [49] pour piéger les insectes. L'attractif est généralement imprégné ou enfermé dans un leurre en caoutchouc ou en plastique (polymère) qui libère lentement les composants actifs sur une période de plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

Il existe des pièges-sondes développés par [50] qui possèdent une fonction de détection et de comptage. Cette sonde, appelée EGPIIC (Piège Electrique Conteur d'Insecte de Grain) [51], utilise une barrière infrarouge intégrée : lorsque le faisceau infrarouge est traversé par un insecte lors de sa chute, il se produit une coupure du faisceau qui est interprétée comme l'enregistrement d'un nouvel insecte piégé. Ces pièges sont disponibles dans le commerce (Treite Inc., Salinds, CA, USA), et sont couramment utilisés pour détecter les insectes adultes dans le grain entreposé [52]. Les Pièges-tubes sont aussi utilisés dans l'évaluation de l'efficacité de la lutte contre les insectes. Cela nécessite d'estimer leur densité à différents niveaux de profondeur des céréales. Pour ce faire, [53] ont élaboré une version empilée de piège-tubes mais cette méthode d'évaluation demande un travail intensif pour peu de données en sortie et ne peut être envisagée que sur des installations adaptées, faciles d'accès.

1.1.1.3. L'entonnoir de Berles

C'est une technique communément connue au Canada dans le domaine du stockage des céréales. Elle est utilisée par la Commission canadienne des grains et les organismes stockeurs afin de déceler d'éventuelles infestations des grains entreposés [54]. Cette technique s'appuie sur le fait que les insectes ne supportent pas les hautes températures et fuient les zones chaudes pour des zones moins chaudes. Une ampoule de 60 watts entourée d'un écran réfléchissant chauffe l'échantillon à analyser. Les insectes se déplacent vers la partie basse, moins chaude, où un récipient se trouvant juste en-dessous d'un entonnoir, sert de collecteur d'insectes [54]. Malgré la lenteur de cette méthode qui nécessite 5-6 h pour capturer tous les insectes adultes et vivants, elle présente un taux d'efficacité allant de 49 à 79 % [55]. Cette variation dans l'efficacité dépend de la taille de l'échantillon analysé et également de l'humidité du grain. La technique de l'entonnoir de Berles n'est pas adaptée à la détection de formes cachées d'infestation [56].

Le piégeage des insectes est une méthode qui a fait ses preuves : il détecte les premiers insectes ce qui détermine le lancement relativement précoce des actions de protections. Les données de piégeage orientent et aident le fermier ou le gestionnaire du silo, à définir les actions les plus adaptées à la bonne gestion des stocks [52].

1.1.3. L'aération

Il ne faut pas confondre aération et séchage du grain. Pour le séchage, l'air est propulsé à travers le grain afin de diminuer la teneur en eau. Le séchage utilise des débits d'air plus élevés que ceux utilisés pour l'aération. Le séchage des céréales se fait à l'aide d'air réchauffé et est souvent effectué, par déplacement du grain à travers un séchoir à grain. Le séchage naturel à l'air libre, pratiqué sans aucune source de chaleur autre que l'énergie solaire, n'est utilisé qu'avec un système de ventilation pour aérer le grain rapidement. Les systèmes conçus pour la seule aération ne sont pas efficaces pour le séchage du grain [57].

L'aération est utilisée pour abaisser la température du stock après récolte. Bien qu'elle nécessite toute une installation, la ventilation est devenue la méthode la moins onéreuse pour lutter contre les insectes [57]. Ghaly [58] rapporte que, suite à une campagne de test menée en Australie sur deux silos de 54 tonnes, de grosses quantités de blé ont pu être stockées pendant 18 mois, uniquement à l'aide de ventilation sans aucun traitement chimique, tout en préservant les qualités physiques et biologiques des grains. Fleurat-Lessard rapporte également [59] que la ventilation peut être considérée à la fois comme une technique efficace de lutte contre la prolifération des insectes mais aussi comme une technique de désinfestation si les conditions météorologiques sont favorables pendant l'hiver. L'expérimentation menée en France durant près de trois mois, a notamment révélé que le charançon de blé est tué si la température est maintenue en-dessous de 7°C. Ce résultat peut être étendu aux autres espèces, comme le charançon de riz mais à une température ne dépassant pas les 10 °C [59].

1.1.4. La température

Depuis longtemps, le froid ainsi que la chaleur ont été utilisés pour la protection des produits stockés contre la dégradation provoquée par les processus physiologiques, les maladies et les insectes. Ils sont également utilisés pour la désinfestation. Pour la lutte contre les insectes ravageurs, les hautes températures comme les basses températures peuvent être efficaces. Le temps d'exposition, la fréquence de changement de la température et le degré de la température sont des facteurs à prendre en compte lorsque l'on cherche à détruire des insectes [60].

Comme pour tout organisme vivant, on distingue trois niveaux de température : une zone optimale où l'espèce se développe avec un taux de croissance élevé, une zone sous-optimale, où la température permet encore à l'espèce d'accomplir son cycle de vie et une zone létale, où la température est au-dessus ou en-dessous de la zone sous-optimale ce qui empêche la survie de l'espèce [61].

La durée d'exposition nécessaire pour neutraliser les insectes diffère entre le traitement à haute et à basse température des lots de grains infestés. Les températures basses nécessitent généralement un temps d'exposition plus important que les températures élevées [61]. Pour la plupart des insectes, quel que soit leur stade de vie (œuf - adulte), une exposition à une température comprise entre 50 à 60 °C durant quelques minutes est suffisante pour les éliminer. Pour obtenir le même résultat à une température de 0 °C, il faut maintenir le grain exposé pendant quelques jours. En revanche, pour une température comprise entre -16 et -22 °C, un temps d'exposition du grain de moins d'une heure est suffisant pour une élimination totale des insectes [61].

Ces principes d'actions curatives thermiques utilisent une ventilation par air chaud ou par air froid ou des systèmes de lit fluidisé [62], [63]. Des tentatives utilisant le rayonnement électromagnétique existent afin de réchauffer le grain dans des systèmes à rayonnement infrarouge [62] ou dans des systèmes à base d'ondes radios à hautes fréquences [64].

1.1.5. L'irradiation

Les rayonnements les plus utilisés pour irradier et stériliser les céréales sont les rayons gamma et rayons X. L'irradiation provoque des dommages dans l'organisme pénétré par les effets ionisants : rupture des liaisons chimiques et endommagement de la cellule [65]. En cas d'exposition à de fortes doses d'irradiation, ces mécanismes provoquent la destruction de l'organisme. Pour le rayonnement gamma [66], différents travaux ont montré que l'éradication des insectes dans des céréales stockés demande un dosage assez fort (> 200 Gy) et un temps d'exposition très long, de quelques semaines [67]. Une élimination immédiate des insectes ravageurs peut être mise en application par une radiation de l'ordre de 1-3 K Gy. Des doses plus faibles de rayonnement ne causent pas la mort immédiate des insectes adultes, en revanche, elles peuvent empêcher l'augmentation des populations de ravageurs dont les conséquences sont les effets létaux sur les stades immatures et la stérilisation des insectes

adultes [66]–[68]. Etant donné que l'insecte dans le stade adulte consomme moins de nourriture que dans le stade de maturation, la stérilisation des insectes par irradiation semble de ce fait, être une technique intéressante afin de palier à leur prolifération. Cette technique empêche les insectes adultes d'y déposer leur progéniture, limitant ainsi les dégâts dans les entrepôts destinés au stockage sur le long terme [65].

1.1.6. Le son

Les insectes produisent des bruits dans le tas de grain au moment où ils se déplacent dans la masse ou grignotent les céréales. Ces bruits générés, peuvent servir comme moyen d'avertissement de leur présence dans les entrepôts. Plusieurs recherches ont été menées depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle afin d'étudier et de détecter ces bruits, par contre il n'y a que peu de recherches qui s'intéressent à la lutte contre des ravageurs par le son. Mullen en 1975 [69] a montré que l'exposition des insectes aux infrasons (10 Hz à 90-120 dB) réduit considérablement (> 20%) le taux de développement de ces espèces. Les ultrasons ont également été explorés, notamment par Harvey et Loomis en 1929, qui ont montré leur effet létal sur les microorganismes [70], notamment les insectes. Pradzynska en 1982 a montré qu'une exposition des insectes pendant une durée de 5 minutes à un son de fréquence 1 MHz à 14,5 W/cm² tue le charançon de blé à tous les stades de développement à une température de 26 ° C dans le blé [71].

1.1.7. Le contrôle de l'atmosphère

Jusqu'au XIX siècle, les silos souterrains constituaient le moyen le plus répandu pour le stockage des céréales en vrac à travers le monde. Dans son article sur l'histoire des entrepôts souterrains [72], François SIGAUT précise que cette technique est bien adaptée pour préserver les entrepôts contre les insectes du fait que la concentration de l'oxygène baisse au fur et à mesure du stockage. Il souligne notamment comme autre alternative, l'emploi d'une atmosphère contrôlée (Figure 12). A partir de la deuxième moitié du siècle dernier, la lutte contre les insectes s'appuyant sur une atmosphère contrôlée, a reçu davantage d'attention de la part de la communauté scientifique. Nous pouvons notamment citer les travaux de [73]–[75].

Une atmosphère pauvre en oxygène peut être mise en place par un rinçage du stock avec de l'azote. On peut utiliser comme source de gaz, un réservoir d'azote liquide [76]. Des générateurs d'atmosphères exothermiques inertes, consommant l'oxygène et ne laissant principalement que de l'azote dans l'espace de stockage ont été testés, et semblent prometteurs pour le contrôle des insectes [77]. Ces générateurs brûlent le propane ou un autre combustible hydrocarboné afin d'obtenir une atmosphère avec moins de 1 % d'oxygène, 10 % de dioxyde de carbone et 89 % d'azote. L'oxygène peut aussi être retiré par l'activité métabolique des micro-organismes et des insectes dans des entrepôts hermétiques, produisant ainsi une atmosphère dans laquelle les insectes ne peuvent pas survivre [78].

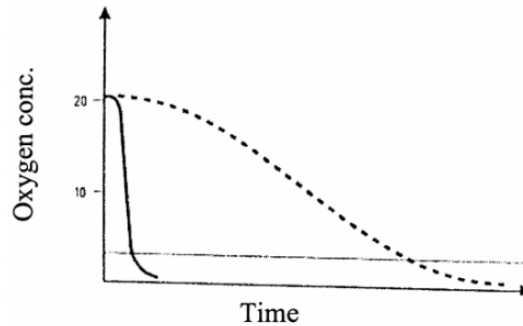


Figure 12 : Changement de la concentration du CO₂ dans le temps causé par le stockage hermétique [76]

Les insectes sont en général tués plus rapidement par une forte concentration en dioxyde de carbone qu'ils ne le sont par manque d'oxygène. Une concentration de 60 % de dioxyde de carbone donnera plus de 95 % de contrôle des insectes, après une exposition de quatre jours à 27 ° C ou plus [79]. Toutefois, des périodes plus longues sont nécessaires pour une élimination totale. Banks dans [80] a suggéré qu'à un niveau initial supérieur à 70 % de dioxyde de carbone, maintenu au-dessus de 35 % pendant dix jours, cette approche est appropriée pour une désinfestation complète à des températures supérieures à 20 ° C.

4.2. La lutte chimique

L'utilisation de produits chimiques (pesticides) pour lutter contre les ravageurs des cultures, n'est pas une pratique nouvelle. En 1200 avant JC, des plantes toxiques telles que la ciguë et l'aconit, furent utilisées pour la lutte antiparasitaire par les égyptiens. Homer (1000 avant JC) décrit comment Ulysse "fumigeait la salle, la maison et la cour à la combustion de soufre pour lutter contre les ravageurs" [66], [81]. De même, dès le XVI^{ème} siècle, les chinois utilisaient le sulfure d'arsenic pour les mêmes raisons [65]. Au début du XX^{ème} siècle, les produits chimiques inorganiques, comme l'arséniate de plomb et de cuivre acétoarsénite, étaient d'usage courant pour contrôler les insectes ravageurs [66].

Ce n'est que vers la fin des années trente, que l'ère des pesticides chimiques de synthèse a véritablement vu le jour, lorsque les organochlorés et organophosphorés insecticides furent découverts. Le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) dont les propriétés insecticides furent trouvées par Paul Muller, fut l'insecticide le plus répandu et utilisé avec succès durant la Deuxième Guerre Mondiale, bien qu'il fût synthétisé une soixantaine d'années auparavant (en 1874 par O. Zeidler) [82]. Après la Deuxième Guerre Mondiale, le DDT est devenu la solution insecticide numéro un. Depuis, l'industrie des insecticides ou plus généralement des pesticides a commencé à prendre de l'ampleur et plusieurs travaux de recherche ont été engagés pour le développement de nouveaux insecticides.

Aujourd'hui, plusieurs types de traitements chimiques existent :

- La pulvérisation consiste à épandre un bouilli préalablement préparé, par dilution d'insecticide dans l'eau, sur le grain en mouvement. La pulvérisation se fait en général grâce à une pompe mettant sous pression le bouilli, afin de le disperser en petites gouttelettes sur le grain.
- La nébulisation repose sur le principe d'enveloppement des grains par un brouillard de produits insecticides. La nébulisation assure une meilleure répartition de la matière active dans le grain [40].
- Le poudrage est une pratique en voie de disparition, utilisée dans certains cas de stockage pour de petites quantités [40].
- La fumigation est une technique de désinfestation au moyen d'un insecticide gazeux appelé fumigant. La fumigation permet de traiter de gros volumes de grains sans le besoin de les déplacer. C'est la seule méthode chimique qui donne un résultat de désinfestation de manière relativement immédiate [5], [40].

4.3. La lutte biologique

La lutte biologique est une méthode exploitant des mécanismes de régulation naturelle des ravageurs. DeBach [83] définit la lutte biologique comme « l'utilisation des parasites, des prédateurs et des agents pathogènes afin de maintenir la densité des populations d'insectes en dessous d'un niveau pouvant provoquer des dommages économiques ». Une autre définition donnée plus tard par Van Driesche et Bellows [84] ajoute à cette dernière « l'utilisation des espèces antagonistes et concurrentes aux insectes ravageurs » [85].

Les interactions entre les insectes et leurs ennemis naturels constituent des processus écologiques essentiels qui contribuent à la régulation des populations d'insectes ravageurs. Dans le cas où cette interaction est perturbée, les populations de ravageurs peuvent connaître un développement sans contrainte, excessif et pouvant provoquer l'invasion de ces parasites.

Les ennemis naturels utilisés dans la lutte biologique contre les insectes ravageurs, comprennent : les agents pathogènes, des prédateurs, des parasites et des parasitoïdes. Les insectes parasitoïdes tuent habituellement leurs insectes hôtes, ce qui les différencie des insectes parasites qui ne le font pas. Flinn et Hagstrum [86] ont montré l'efficacité des guêpes parasitoïdes dans la réduction des dégâts causés par les insectes. Dans une expérience menée dans six cellules de stockage de 27 tonnes chacune, sur une durée de deux ans, ces derniers ont montré que les dommages causés par les insectes dans les cellules dans lesquelles ont été introduites des guêpes parasitoïdes sont significativement inférieurs (réduction < 61%) à ceux causés dans les cellules témoins [86]. Les nématodes entomopathogènes sont des endoparasites létaux des insectes. Ils pénètrent dans l'hôte par les orifices naturels, s'introduisant dans l'hémocèle pour libérer des bactéries qui tuent l'hôte en un temps allant de 24 à 48 heures. Ramos-Rodriguez et al ont montré dans cette expérience, l'effet létal des nématodes

entomopathogènes sur certains insectes ravageurs présents dans les grains entreposés comme le tribolium rouge [87].

4.4. La lutte intégrée

La lutte intégrée se définit par l'emploi d'un panel de techniques et de technologies accessibles : détection, suivi et surveillance des ravageurs, associés à la lutte biologique, physique et même chimique. Les exigences sont d'améliorer la qualité et les rendements, tout en apportant des avantages écologiques en utilisant le minimum de pesticides nécessaires. La lutte intégrée (IPM) représente une approche nouvelle, efficace pour faire face aux différents ravageurs et minimiser le développement de la résistance des ravageurs aux pesticides. En lutte intégrée, on ne cherche pas à éradiquer systématiquement les ennemis, mais à maintenir le niveau de leurs populations en-dessous du seuil de nuisibilité économique [88]. Sa mise en œuvre nécessite une bonne connaissance des ravageurs et de leurs caractéristiques pour définir les moyens adéquats afin d'empêcher leurs prolifération, et la détection de leur présence le plus tôt possible [89]. **Le suivi de la santé du grain et le suivi du niveau d'infestation, sont des indicateurs essentiels pour le pilotage des entrepôts. Un système de détection précoce de la présence des insectes dans le grain, permet aux opérateurs d'optimiser le traitement de l'infestation et offre également plus de temps pour une meilleure gestion de la vente** des lots de grains, avant que l'infestation ne cause une dépréciation de la valeur de ces lots.

La détection de présence des insectes peut être faite selon deux méthodes : les méthodes directes qui utilisent le tamisage, la flottation des grains ou l'entonnoir de Berlese, etc. Les méthodes indirectes qui se basent sur des phénomènes produits par les insectes, telles que la production de dioxyde de carbone ou la détection de leur bruit au moment où ils se nourrissent ou lors de leur déplacement [90]. En France, les méthodes intégrées de lutte contre les insectes ne sont pas bien connues par les opérateurs du stockage et la méthode de lutte demeurant la plus utilisée, est essentiellement l'utilisation d'insecticide de contact [89].

5. Les techniques de détection de la présence d'insectes

Durant ces dernières décennies, plusieurs dispositifs ont été développés en ce sens, en adoptant la logique IPM précédemment décrite. La plupart de ces systèmes se veulent préventifs et se basent sur un objectif de détection précoce des infestations.

5.1. La détection acoustique

La détection du bruit acoustique produit par l'insecte dans le grain au moment où il se déplace dans la masse ou grignotent les céréales, a fait l'objet de recherches depuis plus de 30 ans [90]–[92]. Les recherches réalisées ont abouti au développement de plusieurs systèmes commerciaux pour la détection d'infestation par des insectes (adultes ou sous formes cachées) dans les céréales stockées en

vrac ; ces systèmes bénéficient de mises à jour régulières suivant le progrès dans l'identification informatisée des signatures acoustiques des insectes [93], [94]. Les inconvénients majeurs connus par les premiers dispositifs acoustiques conçus pour le monitoring des populations d'insectes dans le grain en vrac, sont leur faible portée et une sensibilité limitée, qui permet de détecter uniquement des densités de population supérieures à un insecte par kg [92], [95]. Cette limite est comparable aux méthodes classiques de détection d'insectes par analyse des échantillons de grain prélevés. Le traitement numérique des signatures acoustiques est utilisé pour la reconnaissance automatique du spectre du bruit produit par l'insecte parmi différentes sources de bruits de fond [95]. Le grain étant un bon isolant acoustique, la sonde acoustique donne des enregistrements clairs du bruit d'insectes lorsqu'elle est insérée dans la masse de grain sans qu'ils ne soient altérés par le bruit de l'environnement. Ce qui est le plus important, est la détection des formes cachées, c'est-à-dire, la détection de la présence de l'insecte au sein même du grain avant qu'il ne sorte de son milieu de développement. Cette détection précoce, permet aux responsables des stocks d'avoir davantage de temps pour prendre des mesures de désinfestation, et d'éviter ainsi la prolifération des insectes. La sonde acoustique EWD pour (Early Warning Detector) [95], développée par l'entreprise Systelia revendique la détection de la présence des insectes dès leur stade larvaire. Une version commercialisable est disponible aujourd'hui [96].

5.2. La détection par rayons X

La technique de détection par des rayons X, est considérée comme une méthode officielle aux Etats-Unis (AACC1995). Elle a été développée en 1950 afin de permettre la détection d'infestations [97]. Cette méthode est capable de détecter les dommages physiques du grain, les insectes vivants mais aussi les insectes morts. Les performances d'un tel dispositif sont de l'ordre de 97 % de résultats positifs par analyse des images des scans en rayons X (détection des insectes adultes) [56]. Cependant, les œufs et les premiers stades larvaires restent difficiles à distinguer des parties denses du grain. De plus, la mise en œuvre d'une telle technique nécessite une installation coûteuse [98]. Cette technique, identifiant les dommages physiques, peut toutefois être très utile dans la sélection des graines destinées aux semences.

5.3. La détection par la mesure du dioxyde de carbone

Dans le document [99], Semple et al ont établi une relation entre la concentration du dioxyde de carbone et le niveau de l'infestation ou de la moisissure du grain entreposé. Il est connu que les larves de charançon dans leur stade avancé, produisent plus de dioxyde de carbone que les charançons adultes et que l'accumulation de dioxyde de carbone dans un kg d'échantillon de grain infesté pendant 24 h, est facilement mesurable par des analyseurs de gaz de dioxyde de carbone [100]. Il y a deux principaux facteurs qui interfèrent avec la libération de dioxyde de carbone dans le grain : le taux

d'humidité et la température. Si la teneur en eau est supérieure à 14,5 %, la production de dioxyde de carbone produite par les moisissures est beaucoup plus importante que la production faite par les insectes. Aujourd'hui, l'utilisation des dernières générations de capteurs de dioxyde de carbone, avec une concentration détectable très faible à 380 ppm (concentration naturelle de dioxyde de carbone dans l'air), une faible sensibilité aux changements de la température et de l'humidité relative, permet d'effectuer avec précision une surveillance d'infestation dans le grain entreposé [101]. L'utilisation de ces nouveaux capteurs de dioxyde de carbone aujourd'hui disponibles en Amérique du Nord va probablement s'étendre dans tous les pays désireux d'améliorer la prédiction des risques de leurs programmes de lutte intégrée (IPM) [90].

5.4. La détection par spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS)

C'est une technique analytique non destructive, qui a pour principe, l'absorption des ondes électromagnétiques de la gamme 780-2500 nm par la matière. Ainsi, elle fournit des signaux sur la base des propriétés de réflexions différentes des matières présentes dans le produit. A l'aide de méthodes de traitement de signal, on peut déterminer la concentration de substances constitutives telle que l'eau, les protéines, les lipides, et les glucides [56]. La spectroscopie NIR s'est progressivement révélée être une technique rapide, fiable, précise, économique mais aussi utilisable pour l'analyse de la composition des grains [102], aussi bien sur l'aspect qualitatif que quantitatif. Cette technique n'est cependant pas exempte de défauts, elle se montre en effet très sensible à l'humidité du grain analysé et nécessite une re-calibration des instruments de façon fréquente. DOWELL et al. ont réussi à détecter et classifier 11 espèces d'insectes en couplant cette technique avec des méthodes de traitement de signal avec un taux de détection de 95 % [103].

5.5. La détection par conductance électrique

Notons encore que Pearson et al. ont détecté les insectes sous leur forme cachée (larve) dans les grains de blé à l'aide de mesures de la conductance électrique [104].

Le Tableau 1 montre les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de détection des insectes dans le grain.

Méthodes de détection	Positifs	Négatifs	Références
Pièges à insectes	Largement utilisés, peu coûteux, utilisés pour déterminer la densité des insectes, peut donner le nombre d'insectes piégés	Intervention humaine, ne peut détecter les formes cachées, placement restreint des pièges	[105]
Phéromones/Attractifs	Donne une indication de la densité des parasites, accélère le piégeage	Capture influencée par des facteurs environnementaux	[49], [105]–[107]
Leurres visuels	Peut être efficace dans certaines situations	Pas très efficace dans les entrepôts	[108]
Acoustiques	Peut détecter les infestations par des formes cachées, très efficace pour les tests rapides	Ne peut détecter les insectes morts et les premiers stades larvaires, influencée par des facteurs environnementaux	[89]–[91], [93]
Conductance électrique	Formes cachées peuvent être identifiées	Ne peut détecter les premiers stades larvaires, efficacité faible par rapport aux rayons-X	[104]
Entonnoir de Berlese	Peu coûteux, largement utilisé dans les silos (au Canada)	Très lente, ne peut détecter les formes cachées	[52], [54]
spectroscopie dans le proche infrarouge (NIR)	Méthode rapide, ne demande pas une préparation des échantillons	Ne peut détecter les infestations de faible niveau, sensible à l'humidité du grain, demande une calibration fréquente	[100], [102], [109]
Caméra	Efficace dans la détection des insectes externes	Ne peut détecter les formes cachées	[110], [111]
Concentration de CO2	Permet la prévention et le monitoring de l'infestation, détecte les moisissures	Ne peut pas déterminer la source du CO2, demande une installation permanente	[99], [101], [112], [113]
Rayons X	Non destructive, haute précision, détecte	Méthode coûteuse	[97], [98],

	l'insecte dans tous ses stades, capable de détecter les insectes vivants et même les insectes morts	[114]
Simulation / système d'aide à la décision	Ne demande pas une intervention humaine, Permet la prévention et le monitoring de l'infestation	Demande une bonne connaissance de la qualité initiale du grain, calibration fréquente [115], [116]

Tableau 1: Avantages et inconvénients des différentes méthodes de détection des insectes [53]

6. Vers un système complet de surveillance des grains stockés dans les silos

Nous venons de rappeler l'importance économique de ces opérations de stockage des grains, les risques de détériorations qui peuvent les atteindre, notamment à cause de la présence d'insectes et les différentes approches techniques pour détecter leur présence et les éradiquer. L'efficacité de ces approches varie nécessairement en fonction des situations climatiques mais les exigences sont toujours les mêmes :

- prolonger les durées de stockage ;
- assurer la qualité des grains (pas d'insectes, pas de résidus de traitements,...) ;
- réduire l'usage des insecticides.

La détection de la présence des insectes est une fonction clef qui permet, si cette détection est précoce, de limiter l'importance des traitements et de mieux gérer les stocks : même s'il existe une grande variété de possibilités, aucune ne s'est encore véritablement imposée. Nous avons exposé dans ce qui précède, un panorama non exhaustif des principales méthodologies et outils pour faire face aux ravageurs des grains entreposés.

Notre analyse est que les méthodes utilisées aujourd'hui sont plus ou moins efficaces mais qu'elles manquent d'une **vision globale de la problématique du stockage des denrées alimentaires**. Certaines des techniques donnent de très bons résultats en laboratoire, mais ne sont pas aussi efficaces dans la pratique. D'autre méthodes s'avèrent être très efficaces, mais leurs mise en œuvre demande des installations conséquentes et très onéreuses, en plus d'un entretien régulier. La démarche qui nous paraît la plus appropriée est une démarche d'amélioration technique des outils existants associée à un approfondissement de l'approche « lutte intégrée ». La philosophie de la lutte intégrée est basée sur l'étude des risques et l'utilisation des techniques appropriées, afin d'assurer la protection des stocks.

La lutte intégrée préconise le développement de systèmes, garantissant à la fois une bonne qualité de stockage des grains afin d'optimiser le profit tout en assurant également la protection de la santé de l'Homme et de son environnement. C'est pour ces raisons, **qu'un travail sur le développement de systèmes de protection des entrepôts de grains prenant en compte l'aspect écologique, économique, sanitaire et ergonomique, doit être engagé afin de perfectionner le stockage des céréales. Nous rappelons que ce sujet est d'une importance extrême et qu'il constitue un des défis majeurs de notre époque, dans le but d'assurer une alimentation correcte dans un monde qui connaît un accroissement démographique notoire.**

Les spécialistes ont une très bonne connaissance des risques d'infestations. L'idée de transférer de l'homme à la machine l'expertise et les connaissances accumulées dans un domaine donné, notamment dans le stockage des grains, est un sujet de préoccupation important depuis plusieurs années. Cela peut être envisagé par la mise en œuvre de systèmes d'aide à la décision ou par des techniques d'apprentissage (système expert). La vocation d'un système expert est d'aider à résoudre des problèmes difficiles pour l'homme, relevant d'un domaine de compétences particulier où les activités sont difficilement représentables sous forme d'algorithmes [117]. Sa mise en œuvre suppose d'identifier toutes les règles de conduite du silo et de les programmer. C'est une approche assez lourde mais qui a déjà été appliquée par le passé. Cela a permis l'utilisation de systèmes décisionnels pour le suivi et le diagnostic de l'état du grain, la prévision des risques pour les stockages de longues durées, ou comme outil d'identification des insectes [118], [119].

Le Stored Grain Advisor Pro (SGA Pro) [115] est un exemple de système d'aide à la décision dédié au stockage des grains. Ce logiciel est développé dans le but de fournir des informations utiles à la lutte contre les éventuelles infestations dans les silos commerciaux de blé. L'initialisation du SGA se fait à partir des échantillons récupérés depuis le tas de grain à l'aide d'une sonde aspirante. Ces échantillons sont par la suite passés sur un tamis incliné. Le nombre d'insectes trouvés, les mesures de température et d'humidité sont enregistrés sur une fiche informatisée que propose le logiciel. Ces informations constituent une base d'initialisation pour le SGA Pro. À partir de ces données, SGA Pro présente un rapport d'analyse des risques d'infestation, ciblant les cellules qui devront être traitées et le coût des éventuels traitements.

C'est dans ce contexte là que le projet ECOSILO a vu le jour. ECOSILO constitue une nouvelle avancée des objectifs du « paquet pesticide » adopté en 2009 par la Commission Européenne. Ces objectifs visent à la minimisation des risques attachés à l'utilisation des pesticides. ECOSILO vient compléter ces mêmes objectifs de limitation de l'utilisation des pesticides, dans la phase post-récolte ou durant le stockage des grains.

Le projet ECOSILO s'inscrit dans cette démarche à la fois écologique, environnementale mais aussi économique en mettant en place un **système complet** de lutte contre les potentiels risques

d'infestations tout en veillant à réduire l'usage des insecticides. Afin de parvenir à ses objectifs, ECOSILO réunit un consortium de plusieurs industriels, organismes stockeurs céréaliers et laboratoires de recherche de différentes spécialités. Ainsi, ce regroupement de compétences et d'acteurs se montre apte à garantir un développement adapté aux exigences de qualité de stockage et aux exigences réglementaires.

7. Contexte et présentations des objectifs généraux d'ECOSILO

On peut constater à la lecture de ces rappels que la problématique du stockage du grain est une question essentielle dans l'économie mondiale, mais aussi dans la sécurisation de l'alimentation mondiale qui a été souvent étudiée sans que l'on puisse définir une méthode unique et totalement efficace. Dans les stockages qui nous entourent, les grains sont rassemblés dans des cellules en été. L'infestation commence généralement après la moisson des grains, dans les moyens de transport mal nettoyés ou pendant le stockage à la ferme. Les cargaisons infestées ou destinées au stockage à long terme, sont traitées par des insecticides avant ensilage. Les entrepôts sont par la suite ventilés dans les périodes froides pour bénéficier d'un refroidissement rapide du grain et donc ralentir le développement des insectes. Les risques les plus souvent évoqués sont ceux du développement de l'infestation avec le temps et la température, les pollutions résiduelles et les pollutions induites par des apports de grains divers et des manipulations de grains de cellule à cellule.

La commercialisation du grain se fait en regard de la quantité et de la qualité du grain. Il est essentiel que le grain soit exempt de toute substance toxique, que le taux de résidus contenus respecte les limites maximales de résidus fixées par la législation et qu'il ne soit pas infesté. Les clients sont souvent exigeants sur la qualité des grains. Certains sont d'une tolérance zéro dans tout ce qui a trait à la présence d'insectes. Certains le sont moins, mais en règle générale, l'exigence minimum est de moins d'un insecte par dix kilogramme de grains.

L'objectif principal du projet ECOSILO est de proposer une alternative innovante pour la protection des denrées en stock. Contrairement aux traitements préventifs et curatifs pratiqués aujourd'hui à l'aide d'insecticides, cette alternative, repose sur une stratégie de prévention et de suivi de l'infestation et dans le cas d'une éventuelle contamination, l'objectif consiste à traiter au bon moment et au bon endroit. Pour ce faire, le développement et la mise en place d'un système de surveillance *complet* seraient prometteurs, afin de suivre la santé du grain tout au long de la période de stockage. Ce système devra anticiper le développement des insectes au sein du grain stocké, détecter la présence effective des insectes une fois présents dans l'entrepôt et enfin, commander un sous-système de traitement in-situ de l'éventuelle infestation.

En résumé, le nouveau système sera composé de trois sous-ensembles :

- un module de suivi et de surveillance de la santé des céréales ;

- un module d'aide à la décision et de contrôle-commande ;
- le traitement local des éventuelles infestations après avoir regroupé les insectes dans le volume le plus étroit possible à l'aide d'attractifs alimentaires ou de phéromones.

Le Tableau 2 suivant liste l'ensemble des membres du consortium et récapitule l'activité de chacun et son rôle au sein du projet ECOSILO.

Nom	Adresse siège	Activité/rôle
AB7 Innovation	BP9 – Chemin Monges 31450 Deyme	Porteur du projet Coordinateur Développeur et fabricant du système de traitement raisonné
DE SANGOSSE	"Bonnell" - BP5 47480 Pont du Casse	Fabricant et fournisseur en agrofouritures et anti-nuisibles (à l'échelon national et mondial). Expertise réglementaire et commercialisation du système de protection raisonnée (post homologation)
ARTERRIS	Loudes 11451 Castelnaudary Cedex	Organismes stockeurs et collecteurs de céréales Utilisateur du nouveau système de traitement raisonné. Expérimentation stade pilote en cellule de stockage
SUD CEREALES	Mas des Saules RND 6113 30300 Beaucaire	
CEREVIA Union des Coopératives Agricoles	4 boulevard de Beauregard 21604 Longvic Cedex	
Laboratoire de Chimie Agro-industrielle LCA (INP)	4, allée Emile Monso - BP 44362 31030 Toulouse Cedex 4	Valorisation industrielle des productions agricoles et forestières Formulation et vectorisation des solutions insecticides et attractifs
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (CNRS)	7 avenue du colonel Roche 31 077 Toulouse Cedex 4	Conception-prototypage des composants capteurs actionneurs du nouveau système de traitement raisonné.
MycSA Mycologie et Sécurité des Aliments (INRA)	CR INRA Bordeaux-Aquitaine BP 81 – 33883 Villenave d'Ornon cedex	Recherche sur les insectes et résidus de pesticides et leur devenir dans la chaîne alimentaire

Tableau 2 : Les membres du consortium ECOSILO

8. Problématique de la thèse

Ce travail de thèse se situe dans le cadre des travaux consacrés par le groupe N2IS- LAAS autour de la surveillance des systèmes. Ces travaux s'appuient sur une approche de suivi originale,

basée sur la comparaison entre les mesures courantes de données caractéristiques du système et les données estimées déduites par l'apprentissage, l'analyse et la modélisation du comportement habituel de ce dernier. L'objectif est de détecter toutes les dérives par rapport à ce comportement dit normal. Du point de vue méthodologique, la surveillance du grain dans les silos, telle que nous nous proposons de la traiter, met en jeu des questions nouvelles de modélisations : utiliser des modèles biologiques de développement des insectes pour donner un caractère préventif à la surveillance. Pour ce faire, nous nous appuierons sur l'expérience et sur les travaux récents effectués dans le domaine de l'entomologie par nos partenaires de l'INRA, afin de mieux connaître le comportement des insectes en silo et, d'autre part, sur de nouvelles techniques de surveillance multi-capteurs qu'il conviendra de développer et de mettre en œuvre dans ce travail.

Au-delà des aspects liés aux méthodologies générales de surveillance des systèmes, nous poursuivons dans ce projet ECOSILO, un objectif appliqué de démonstration sur site réel de l'efficacité de nos propositions, ce qui implique des développements matériels et logiciels adaptés. Ce volet technique de nos travaux se situe dans le cadre des actions microsystèmes du Laboratoire et de leurs mises en réseaux en vue de collecter les données utiles aux diagnostics.

Nous nous intéresserons en particulier à :

- L'élaboration d'un système de mesures multi-sensorielles basé sur des capteurs répartis afin de surveiller les céréales et de détecter de manière précoce les insectes. Pour cela, il sera nécessaire d'établir des modèles comportementaux de l'évolution des insectes en fonction des paramètres ambiants et des modèles thermiques liés aux silos de stockage.
- L'élaboration d'un outil logiciel de contrôle-commande et d'aide à la décision.
- Le développement d'une interface homme-machine simple, afin de faciliter le suivi de l'évolution des paramètres surveillés par les opérateurs.
- Le déclenchement d'un traitement dans le cas où cela devient nécessaire.
- La conception et le prototypage du système en laboratoire.
- Les tests et validation des modèles/algorithmes sur des données réelles, en termes de performance de prédiction.

9. Conclusion

La protection post-récolte du grain contre les différents ravageurs, notamment pendant la période de stockage, est un enjeu réel de notre époque, particulièrement lorsque les réserves mondiales en matière de céréales sont insuffisantes pour faire face à l'explosion démographique. Les insectes se développant dans le grain représentent les premiers ravageurs des denrées entreposées. Afin de faire face à ces ravageurs, plusieurs techniques et méthodes de lutte ont été développées. Grâce à leur

efficacité à court terme, l'utilisation des insecticides reste la solution la plus répandue à cet effet, et ce, sans prendre en compte leur impact nocif sur l'environnement.

Après un siècle d'utilisation de ces produits « insecticides », la limitation de leur application devient une exigence de première nécessité au vu des dégâts engendrés par leur usage sur la santé humaine et sur l'écosystème. Plus grave encore, différentes espèces d'insectes ont pu développer une résistance face à ces produits toxiques et plusieurs molécules insecticides ont perdu leur effet létal sur les insectes cibles. C'est pour ces raisons que l'ingénierie agroalimentaire doit repenser ses systèmes de lutte contre ces nuisibles afin d'améliorer à juste titre, les conditions de stockage des céréales.

Nous avons mis en exergue dans ce premier chapitre, l'importance majeure de la préservation des grains stockés dans l'alimentation de l'Homme. Nous avons également présenté les différentes techniques de lutte contre les ravageurs des denrées alimentaires ainsi que leurs limites. Il ressort de ces analyses plusieurs insuffisances :

- les techniques de détections de la présence des insectes sont inadaptées ou insuffisamment développées pour donner une information précoce indispensable à la préservation de la qualité du grain ;
- le concept d'approche intégrée associant plusieurs techniques de détections et de traitement est bien identifié mais encore trop peu exploité.

Notre analyse est que la philosophie d'une lutte intégrée est suffisamment « mûre » pour inspirer le développement de nouveaux systèmes qui proposeraient un suivi et une surveillance permanente de l'état de santé du grain, s'inspirant des architectures des systèmes dits de surveillance ou de « monitoring », en se basant sur un réseau de capteurs et d'actionneurs installés dans les cellules de stockage. Ce système doit être capable de délivrer un véritable « certificat de qualité du grain », de l'arrivée du grain dans le silo jusqu'à sa livraison.

L'objectif de cette thèse s'inscrit dans cette dimension tout en gardant à l'esprit la nécessité pressante de proposer une alternative aux méthodes actuellement utilisées et où les insecticides occupent une place encore trop importante. Notre ambition sera donc de combiner plusieurs méthodes et technologies aujourd'hui accessibles, tout en prenant en compte l'aspect écologique, sanitaire et économique en rapport avec le stockage. Le projet ECOSILO a été construit avec cette ambition : Le consortium ECOSILO présenté à la fin de ce chapitre, regroupe plusieurs industriels, organismes stockeurs et laboratoires de recherche dans le but de mutualiser les savoir-faire, afin de concevoir, de développer et de tester un système de surveillance **complet** qui limite et optimise l'usage des insecticides par une détection précoce de leur présence dans le grain.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre démarche de conception du système complet de lutte contre les insectes que nous avons nommé, SILOCARE et qui implique des développements sur le

choix d'une architecture informatique, sur le choix des capteurs les plus pertinents et sur les algorithmes de préventions, détections et de commandes.

Chapitre II : Conception d'un système de surveillance des stockages de grains en silos

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons rappelé les problèmes liés au stockage des céréales, ainsi que les solutions actuellement pratiquées pour leur conservation, faisant généralement appel aux produits insecticides, avec les conséquences que l'on connaît sur la santé humaine et sur l'environnement. De plus, la généralisation de l'usage des insecticides a provoqué le développement d'une résistance des insectes face à ces produits. Dans ce contexte, **la conception et le développement de nouveaux systèmes de surveillance et de traitement, devient une exigence essentielle pour préserver à la fois le grain et l'écosystème.**

C'est dans cette perspective que nous ambitionnons d'apporter une contribution à la résolution de cette problématique, en explorant l'idée d'un système complet de surveillance des grains stockés en silo, assurant les fonctions de détection au plus tôt des insectes et la commande de traitements optimisés sur des critères de protection des grains et de la santé humaine.

Les grandes lignes de notre contribution sont :

- de tirer le meilleur parti des possibilités nouvelles, ouvertes par l'usage d'attractifs capable de « rassembler » les insectes en des endroits propices à leur destruction, en limitant fortement les traitements insecticides : Ce volet est pris en charge par AB7, dans le cadre du projet ECOSILO ;
- de viser à une détection des insectes au plus tôt et si possible de mettre en place une procédure permettant d'anticiper leur survenue : ce volet original est un volet important de notre contribution qui s'appuie sur l'idée d'exploiter un modèle biologique de croissance des insectes ;
- de concevoir des modules capteurs, intelligents, connectés, de surveillance, et un système SILOCARE d'intégration de tous ces capteurs dans un système complet de surveillance, capable d'anticiper le risque de développement des insectes, de détecter leur présence effective, de lancer des alarmes, et de commander les traitements de manière automatique.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de notre démarche générale de conception qui conduisent à la proposition d'un système complet SILOCARE structuré autour de l'idée de concevoir et d'exploiter **un modèle biologique de prédiction de croissance des insectes**. Nous explorons d'abord les différentes possibilités de détections que nous pourrions intégrer dans ce système complet de surveillance. Nous traiterons ensuite successivement : de l'architecture système, de la prévention

des risques avec des modèles Thermique et Biologique, et de la détection, en nous efforçant de faire des choix.

2. Démarche générale de conception : analyse des besoins et choix des solutions

Notre approche s'inscrit dans la démarche ECOSILO présentée en Chapitre I, dans laquelle nous voulons apporter les avancées suivantes : une prévention des risques par l'intégration système d'un modèle biologique prédictif de croissance, une détection sur site précoce adaptée aux comportements des insectes dans les silos, un système multi-capteur complet SILOCARE de surveillance et de traitement automatique.

Un préalable à ce travail de conception est de prendre en compte les caractéristiques de vie des insectes et leur dynamique de croissance en silo. Les insectes sont déjà potentiellement présents dans les moyens de transport des récoltes, en fonction des pratiques des agriculteurs. Nous allons donc devoir contrôler leur présence effective au moment de la mise en silo (ensilage), et éventuellement traiter la récolte par insecticides (ce traitement est quasi systématique aujourd'hui pour les stockages de longue durée). Les insectes, si les conditions environnementales les favorisent, vont avec le temps, se développer dans les endroits les plus propices. Les échanges avec les gens de métier conduisent aux hypothèses suivantes :

- les insectes se développent préférentiellement dans les parties chaudes, c'est-à-dire dans les parties hautes du tas de grains qui se trouvent plus directement influencées par les températures extérieures au printemps ;
- les insectes peuvent se développer en tous points s'il y a une infestation résiduelle lors du stockage, ce qui est le plus probable compte tenu du fait que les arrivages sont d'origines multiples et donc hétérogènes en qualité et niveaux d'infestations.

La partie centrale du silo est très mal contrôlée, mal aérée, très compressée et très poussiéreuse. On ne sait rien sur les insectes mais cette partie du silo présente fondamentalement un danger d'explosion par inflammation des poussières.

Rajoutons à ces éléments de conception les exigences de la démarche ECOSILO sur l'usage d'attractifs pour rassembler les insectes et limiter les traitements.

Nous avons donc travaillé selon trois axes d'interventions :

- **la surveillance du haut du silo** qui a conduit à la proposition SILOTEST 1 ;
- **le test de la qualité des grains à l'entrée du silo** ce qui a conduit à la proposition SILOTEST 2 ;

- **la surveillance de toute la hauteur du grain** ce qui a conduit à la proposition SILOTEST 3.

Dans ces trois développements, notre stratégie a été de concevoir des dispositifs multi-capteurs dont les principes de détection des insectes ont été inventoriés dans le Chapitre I.

La température : elle est a priori peu sensible en terme de détections d'insectes mais indispensable pour des raisons sécuritaires ; de plus, elle est systématiquement implantée dans les silos et bénéficie d'une longue expérience d'utilisation ;

La détection acoustique : c'est une approche préconisée par ECOSILO qui intègre la fourniture de la sonde développée par la société SYSTELIA [120]. L'intérêt de ce choix est que la sonde acoustique permet de détecter à la fois la larve et l'insecte, ce qui en fait un dispositif de détection précoce ; la limite de la sonde acoustique est son faible rayon de détection (moins de 50 cm). Dans le cadre ECOSILO, dans la mesure où on vise l'usage d'attractifs, il est évidemment intéressant d'imaginer un ensemble : attractifs, sonde acoustique et traitements localisés. C'est d'ailleurs un argument majeur d'ECOSILO ;

Le CO₂ : un point important de notre contribution est l'intégration d'un capteur de CO₂ dans le système complet de surveillance SILOCARE. C'est une approche que finalement, nous allons recommander. Elle présente un intérêt potentiel : le gaz produit par les insectes et les moisissures plus lourd que l'air, a tendance à descendre dans la partie basse du silo où sa concentration va croître de manière continue, au fur et à mesure de sa production ; c'est donc une option a priori très sensible et facile à imaginer, placée à demeure, en fond de silo de manière systématique. Attention, elle résulte bien de l'activité des larves et insectes mais aussi du développement des champignons, des moisissures et de la respiration des grains.

Nous avons vu dans le premier chapitre, qu'aujourd'hui plusieurs systèmes de lutte contre les insectes existent, mais que tous ces systèmes souffrent d'un manque soit d'une vision adaptée aux besoins, soit d'une vision globale du problème de la protection des denrées entreposées. Nous avons rappelé les différentes étapes et risques par lesquelles le grain passe avant d'arriver aux silos de stockage, puis dans la durée du stockage. Ces analyses préalables nous invitent à :

- introduire l'idée d'une démarche préventive ;
- envisager une combinaison de plusieurs dispositifs : test rapide à l'entrée du silo (SILOTEST 2), test en haut du tas de grains (SILOTEST 1), système de surveillance à demeure (SILOTEST 3).

Notons que l'on peut imaginer des solutions spécifiques sur lesquelles nous reviendrons, par exemple, concernant le stockage à la ferme.

3. La conception d'un système complet SILOCARE

Nous ambitionnons, à travers les objectifs du projet ECOSILO, la conception d'un système offrant une solution complète à la problématique du stockage des grains en silo. Pour ce faire, nous avons opté pour une solution modulaire : le système SILOCARE qui associe plusieurs modules complémentaires les uns aux autres.

Le système SILOCARE est d'abord un système de surveillance multi-sensoriel. Un **réseau de capteurs** est déployé dans le silo à grains afin de prélever des mesures d'un certain nombre de paramètres caractéristiques (température, humidité,...), et de surveiller « en continu » les phénomènes à risque parmi les plus significatifs pour la sécurité du silo : présence et croissance des insectes, évolution de la température et de l'humidité,...

Un système complet de surveillance doit aussi associer les blocs fonctionnels suivants :

- Le réseau multi-capteur pour mesurer les valeurs des différents paramètres à surveiller.
- Un réseau d'actionneurs qui permettra le traitement in situ.
- Une électronique qui assurera l'intelligence du système et qui sera en communication avec le réseau de capteurs et le réseau d'actionneurs.
- Une mécanique capable de porter et de protéger l'électronique du système ainsi que le réseau de capteurs/actionneurs.
- Une fonction prédiction de l'infestation.
- Une fonction détection de l'infestation.
- Une fonction traitement local de l'infestation.
- Une interface homme-machine donnant accès à la gestion du système.

3.1. L'architecture du système SILOCARE

Une fois installé dans le silo, le système récupère et enregistre dans une base de données, toutes les informations issues des capteurs, soit par voie de communication filaire ou Radio. Les données enregistrées sont traitées au niveau du serveur central. Le traitement consiste d'abord à établir un modèle empirique du fonctionnement du silo : le modèle thermique qui doit pouvoir prédire l'évolution de la température en tous points du tas de grain et le modèle biologique qui doit pouvoir prédire l'évolution de la densité d'insecte ; en pratique ces deux modèles doivent être couplés puisque la température influence principalement la croissance des insectes. Les paramètres du modèle thermique sont mis à jour quotidiennement, et le nombre d'insectes est à chaque cycle prédit.

Le modèle thermique doit donc modéliser le comportement thermique de la cellule de stockage. Pour rendre le système prédictif, il faut s'appuyer sur les prédictions météorologiques qui anticipent les conditions de température à 15 jours et sur les données historiques pour anticiper sur plusieurs mois

dans le but de pouvoir par la suite, en fonction des données de la météo, simuler ou prédire la température interne du tas de grain aux points où nos capteurs sont installés. Avec l'évolution des systèmes de la météo, il sera possible d'avoir les températures précisément prédites au-delà des 2 semaines actuelles.

Une fois la température du grain calculée, nous faisons appel au modèle biologique, dans le but de prédire, sur la base de modèles biologique reconnus, le nombre d'insectes qui pourraient être présents en un certain laps de temps.

Le couplage d'un modèle thermique et d'un modèle biologique de croissance doit permettre de prévenir « au plus tôt » du risque d'infestation, permettant ainsi à l'opérateur de s'organiser au mieux, et de prendre la décision adéquate afin de préserver l'entrepôt d'éventuelles pertes quantitatives ou qualitatives. Le schéma de la Figure 13 illustre la composition fonctionnelle du système SILOCARE.



Figure 13 : Les modules constituant du système SILOCARE

3.1.1 Le module prévention

L'objectif de ce module est de prévenir les opérateurs d'un risque calculé d'une éventuelle infestation dans un futur proche. Cette prédiction est « calculée » en s'appuyant sur un réseau de capteurs déployés dans le silo à grains, mais aussi sur des données de la météo et sur les connaissances acquises sur le développement des insectes (modèle biologique de croissance des insectes). Nous détaillerons plus amplement le principe de la prédiction de l'infestation un peu plus loin dans ce chapitre.

3.1.2 Le module détection

Ce module a comme principal objectif, le déclenchement d'une alarme le plus tôt possible, afin d'avertir les opérateurs d'une infestation « effective » de l'entrepôt. La détection de la présence des insectes doit reposer sur des données capteurs les plus sensibles possibles et capables de détecter la présence des insectes adultes, et, autant que possible, leur présence dès le stade larvaire.

3.1.3 Le module traitement

Ce module se charge du traitement des éventuelles infestations au sein même du tas de grains. Ce module est conçu par l'entreprise AB7-innovation. Pour notre part, nous n'avons en charge que

d'assurer la commande des actionneurs. Le fonctionnement de ce module ne sera donc pas détaillé dans le présent rapport.

Cela conduit à une architecture système telle que représentée par la Figure 14 :

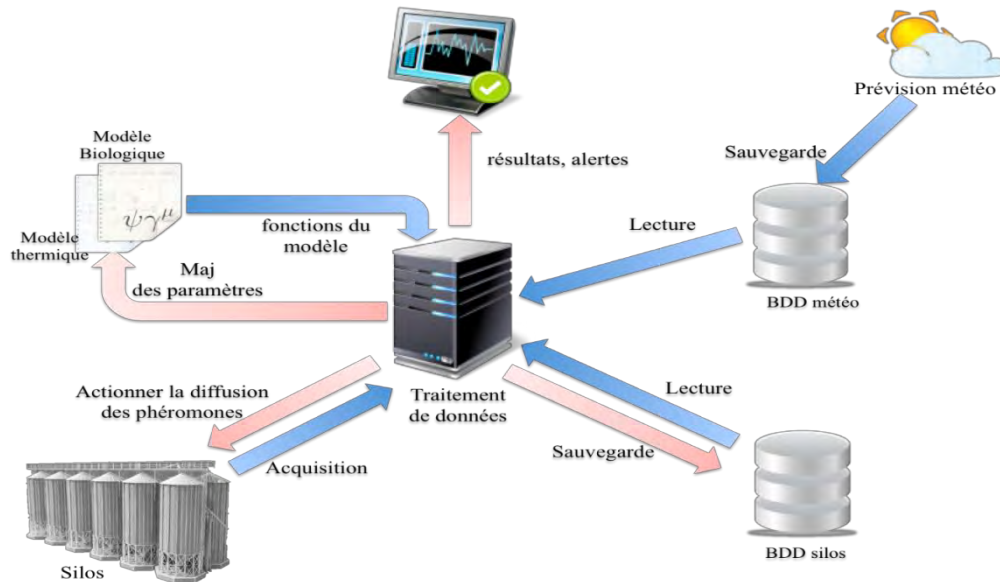


Figure 14 : Architecture du système SILOCARE

4. La prévention

'Mieux vaut prévenir que guérir' est un principe médical datant de l'antiquité que nous pensons devoir être appliqué dans la protection des denrées entreposées, d'autant plus lorsque les effets néfastes des traitements chimiques de traitement sont plus qu'avérés.

Pour appliquer notre concept de prévention, il faut disposer d'un modèle biologique de développement des insectes et d'une modélisation thermique du silo.

Dans ce que suit, nous commencerons par présenter la manière dont les insectes se développent et l'option que nous avons retenue pour modéliser leur développement.

4.1. Les modèles biologiques de croissance

L'agriculture intensive qu'on a connue au cours du XX^{ème} siècle n'a cessé de renforcer la nécessité de développer méthodes et outils pour protéger les stockages de denrées alimentaires contre les ravageurs. Après la seconde guerre mondiale, l'utilisation des pesticides s'est répandue de manière spectaculaire : leur efficacité ainsi que la simplicité de leur utilisation, leur ont permis de s'imposer comme moyen essentiel dans la protection contre les ravageurs des cultures. Cette utilisation démesurée a conduit par la suite à une dépréciation de leurs applications, pour plusieurs raisons sanitaires et écologiques, dont certaines ont été explicitées dans le premier chapitre [121], [122].

Au début des années 70, la protection intégrée, vue comme une optimisation globale du stockage de grain, a commencé à émerger de telle sorte que la recherche scientifique s'est intéressée de plus en plus au développement des méthodes s'inscrivant dans ce cadre. Un objectif majeur est la minimisation de l'utilisation des pesticides, tout en visant à limiter les pertes causées par les ravageurs par l'intégration de toutes les méthodes écologiques efficaces de surveillance et de contrôle. Grâce à la mobilisation des équipes de recherche, l'accumulation des connaissances biologiques fondamentales et empiriques sur le développement et la multiplication des ravageurs, des modèles biologiques mathématiques décrivant la phénologie des insectes très précis ont vu le jour et sont aujourd'hui disponibles. Ces modèles permettent de prédire, dans des conditions environnementales contrôlées, l'évolution du développement dans le temps des populations d'insectes. Ces modèles biologiques de croissance sont des modèles phénologiques, qui peuvent être utilisés pour prévoir ou prédire l'apparition d'un éventuel développement des ravageurs, dans un cycle météorologique saisonnier.

Ce qui nous intéresse dans cette perspective, est le suivi de la croissance des insectes au sein du grain, notamment la croissance des espèces les plus dangereuses en France (voir Tableau 4). La modélisation de la croissance de ces insectes nous permettra de mieux gérer les infestations ou même de les éviter, ce, en anticipant les dates d'interventions ou en contribuant à définir une politique de transformation et de commercialisation des stocks à vendre... Prévoir les dates d'intervention permet également de limiter leurs coûts. Ainsi, une protection efficace et écologique à moindre coût sera possible, ce qui est l'objectif de IPM [121].

Les insectes sont des êtres vivants à sang froid (*poikilothermes*), c'est-à-dire qu'afin d'accomplir leurs fonctions physiologiques tel que le développement du métabolisme, ces insectes puisent l'énergie nécessaire dans leur environnement de vie, y compris dans la chaleur ambiante. Dès lors, **la température ambiante est le facteur le plus influant sur la croissance de l'insecte**. En général, la baisse de la température cause un ralentissement dans le développement des insectes jusqu'à ce que ce dernier, ayant atteint un certain seuil de température (seuil bas), cesse complètement de se développer. L'augmentation de la température se traduit, quant à elle, par un accroissement du taux de développement, jusqu'au taux maximum correspondant à la température optimale au-dessus de laquelle, celui-ci diminue à nouveau et finalement s'arrête à la température maximale (seuil maximal) [123]. La Figure 15 récapitule ce que nous venons de rappeler dans ce paragraphe [124].

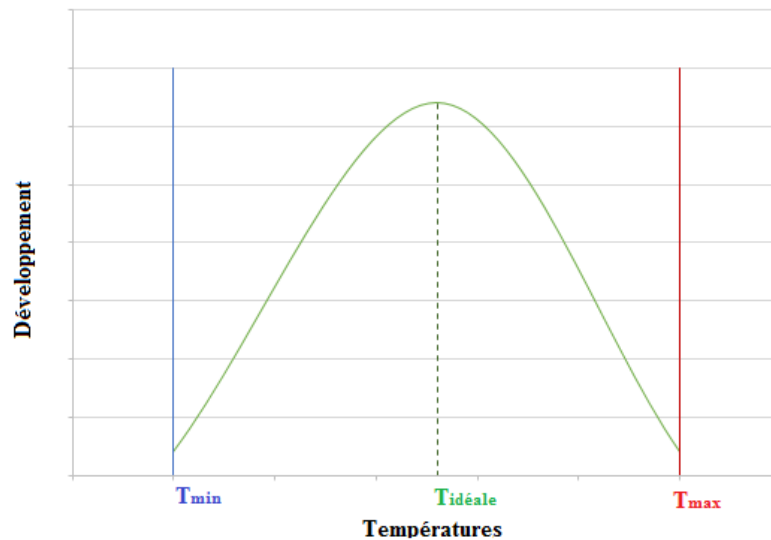


Figure 15 : Taux de développement des insectes en fonction de la température

4.1.1 Les modèles prédictifs d'infestation

Dans le but de prédire le développement des insectes, plusieurs modèles prédictifs ont été proposés. Nous pouvons classer ces modèles en deux grandes catégories : les modèles se basant sur le calcul des degrés-jours ou modèles linéaires et les modèles de simulation du développement d'insectes sur ordinateur ou modèles non linéaires [57].

4.1.1.1 Modèles basés sur la notion de « Degrés-jours »

Le temps d'un cycle de développement, de l'œuf pondu par une femelle jusqu'à l'émergence d'un nouvel insecte adulte, est en étroite corrélation avec le cumul des températures journalières moyennes comprises entre deux seuils (Figure 15). Chaque espèce a des seuils spécifiques. La méthode la plus simple pouvant être utilisée pour calculer les degrés-jours nécessaires au déroulement d'un développement complet d'une espèce d'insectes donnée est la suivante : jour après jour, la moyenne de la température minimale ainsi que la température maximale comprise entre les deux seuils spécifiques à l'insecte cible sont additionnées. Au moment où la somme arrive au niveau degrés-jours nominatif correspondant à un cycle de développement complet, on considère qu'une nouvelle génération d'insectes a émergé. Les degrés jours spécifiques pour chaque insecte ont été déterminés de manières expérimentales. Différentes méthodes de calcul existent et sont parfaitement résumées dans le document [125]. Le Tableau 3, donné par F. Fleurat-Lessard, regroupe les données de dynamique des espèces potentiellement dangereuses pour les grains stockés [126].

Espèce insecte	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	Degrés* jours > T _{min} par génération	Facteur multiplication maxi / génération Fm _{max}	Nombre de Degrés*jours pour population x 100	Nombre de jours avant x 100 à 20°C (temp. moyenne grain non refroidi)	Nombre de jours avant x 100 à 15°C (temp. moyenne grain refroidi)	Référence auteur
<i>Sitophilus granarius</i>	11	32.5	532	16.1	3304	367	826	Steffan, 1978
<i>S. oryzae</i>	13	35.6	536	23.4	2291	327	1145	Steffan, 1978
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	15	35.5	375	71.4	525	105	Infini	Fleurat-Lessard et al, 2005
<i>Rhyzopertha dominica</i>	17.5	36	462.5	19.5	2372	949	Infini	Fleurat-Lessard et al, 2005
<i>Tribolium castaneum</i>	18	36	299.4	73.7	406	203	Infini	Fleurat-Lessard et al, 2005
<i>Cryptolestes ferrugineus</i>	15.7	36.7	359	75	479	111	Infini	Subramanyam et al., 1991
<i>Sitotroga cerealella</i>	8	35	616	53.6	1149	96	164	Fleurat-Lessard et al, 2005
<i>Plodia interpunctella</i>	15.4	32.5	435.7	25	1743	379	Infini	Subramanyam et Hagstrum, 1993

Tableau 3 : Les seuils degrés-jours nominatifs des espèces dangereuses [124]

La prédiction par la méthode des degrés-jours présente l'avantage d'être simple à appliquer, néanmoins la prédiction reste tardive. Cette méthode représente le développement de la population des insectes sous forme de fonction linéaire entre le développement et la température environnante. Elle nous donne pour chaque cycle de développement le point de départ et le point d'arrivée, c'est-à-dire la date du début du cycle (ponaison de l'œuf) et la dernière date du cycle (éclosion de l'œuf). Cette méthode de prédiction du développement des insectes peut donner de bons résultats en ce qui concerne les températures intermédiaires, en revanche du fait de sa linéarité, les résultats donnés pour les températures hautes ou même basses sont erronés [112], [127].

4.1.1.2 Modèles empiriques

Certains modèles de simulation de développement, sont des modèles empiriques (généralement) reposant sur l'historique (temps de développement, nombre d'œufs pondus) du développement de l'insecte en fonction d'un certain nombre de paramètres, principalement la température et l'humidité ou la teneur en eau du grain. Ces modèles expérimentaux se présentent comme des équations mathématiques issues de régressions non linéaires, mettant en relation les paramètres influant et la dynamique temporelle de développement des insectes [108], [109], [127]. Pour rester efficacement dans le cadre de nos travaux, nous nous basons sur les études faites en France concernant les espèces les plus dangereuses dans les stocks de céréales français : dans le cadre du projet national CASDAR "EcoprotectGrain", une étude sur le dépistage des différentes espèces présentes dans les stocks de longue durée a été menée par l'INRA Bordeaux en collaboration avec FranceAgriMer. Cette étude a été réalisée dans les principales régions productrices de céréales en France et cela sur deux saisons : 2010 et 2011. Les deux charançons de riz et de blé apparaissaient comme les espèces les plus redoutables [128]. Le Tableau 4 récapitule les résultats du traitement d'échantillons prélevés sur les 190 sites participant à cette enquête.









Ravageurs primaires	Charançon des grains (<i>Sitophilus granarius</i>)	
	Charançons du riz (<i>Sitophilus oryzae</i>)	
	Capucins des grains	
Ravageurs secondaires	Tribolium sombre	
	Tribolium roux	
	Silain	
	Petit silvain plat	
	mycétophages	

Tableau 4 : Les principales espèces d'insectes présentes dans les stocks Français [130]

4.1.2 Le choix du modèle biologique SILOCARE

Nous avons vu dans ce qui a précédé, que plusieurs approches existent afin de prédire la croissance des insectes. Chacune de ces méthodes a des avantages mais aussi des inconvénients. Notre objectif de sécurisation des grains a des exigences fortes en termes de précision et de robustesse de la prédiction. Au-delà de l'influence de la température, ce qui nous paraît indispensable est de prendre en compte l'influence de l'humidité (teneur en eau du grain) sur la croissance des insectes ; négligée, cette variable entraîne des insuffisances dans l'estimation de la croissance, surtout quand les températures sont proches des valeurs extrêmes [129]. Cette variable peut être considérée comme non essentielle sur certaines espèces secondaires se développant à l'extérieur du grain et qui ne sont pas les plus dangereuses en France contrairement aux espèces primaires qui se logent à l'intérieur du grain pour leur développement juvénile [128].

La mesure de l'humidité du grain (la teneur en eau) n'est pas chose aisée et demande un développement conséquent. Nous retenons une solution proposée dans la littérature qui calcule l'humidité du grain, à partir de l'humidité de l'air inter-grains considérée à l'équilibre, moyennant une équation établie de manière empirique [130], [131]. Nous avons réfléchi à la conception, par mesure d'impédance, d'un capteur mesurant directement la teneur en eau du grain. Pour des raisons de coûts de développement et de miniaturisation extrême souhaitée pour ce capteur, **la solution de passer par la mesure de l'humidité de l'air a été retenue** : elle est une solution techniquement avantageuse dans la mesure où des capteurs d'humidité miniaturisés existent de manière courante : rappelons que notre démarche dans la conception du système SILOCARE est de simplifier au maximum toutes les procédures afin de proposer un outil de surveillance miniaturisé, fiable et simple d'utilisation.

Pour notre application, nous proposons d'utiliser le modèle prédictif de Driscoll [132] qui représente le modèle le mieux adapté à notre système : Ce modèle prend en compte l'influence de l'humidité du grain tout en se basant sur l'humidité relative de l'air inter-grains. L'équation proposée par Driscoll donne une estimation du nombre d'insectes à n'importe quel instant t , grâce au calcul du taux de développement intrinsèque r_m [133] à tout instant t . Le calcul du taux de développement r_m se fait en deux étapes complémentaires : le premier terme ou l'Équation 3 exprimant l'influence de l'humidité et l'Équation 2 qui combine l'Équation 3 avec un deuxième terme qui est l'expression de la température.

$$N(t_n) = N(t_{n-1}) e^{(r_m(t_n) * t)} \quad \text{Équation 1}$$

$$r_m(t_n) = f(HRE) e^{(k_1 * T * K_2 * (T_m - T))} \quad \text{Équation 2}$$

$$f(HRE) = K_a + K_b * RH + K_c * RH^2 \quad \text{Équation 3}$$

Espèces	K_a	K_b	K_c	K_1	K_2	T_m	r^2
Rhyzopertha dominica	0.1673	0.8477	-0.698	0.0607	0.01541	39.50	0.95
Sitophilus oryzae	-0.0399	0.2308	-0.171	0.143	0.05425	33.03	0.93
Sitophilus oryzae(high r.h. model)	0.4413	1.609	-1.141	0.047	0.00753	34.55	0.94
Oryzaephilus surinamensis	0.2907	0.1273	-0.0326	0.7174	0.01625	36.13	0.95
Tribolium castaneum	0.7197	2.701	-1.876	0.0314	0.00242	41.29	0.96

Tableau 5 : Coefficients suivant les espèces [134]

Les coefficients T_m , K_x sont calculés expérimentalement pour chaque espèce surveillée. Le Tableau 5 donne les différentes valeurs de ces coefficients pour chaque espèce considérée.

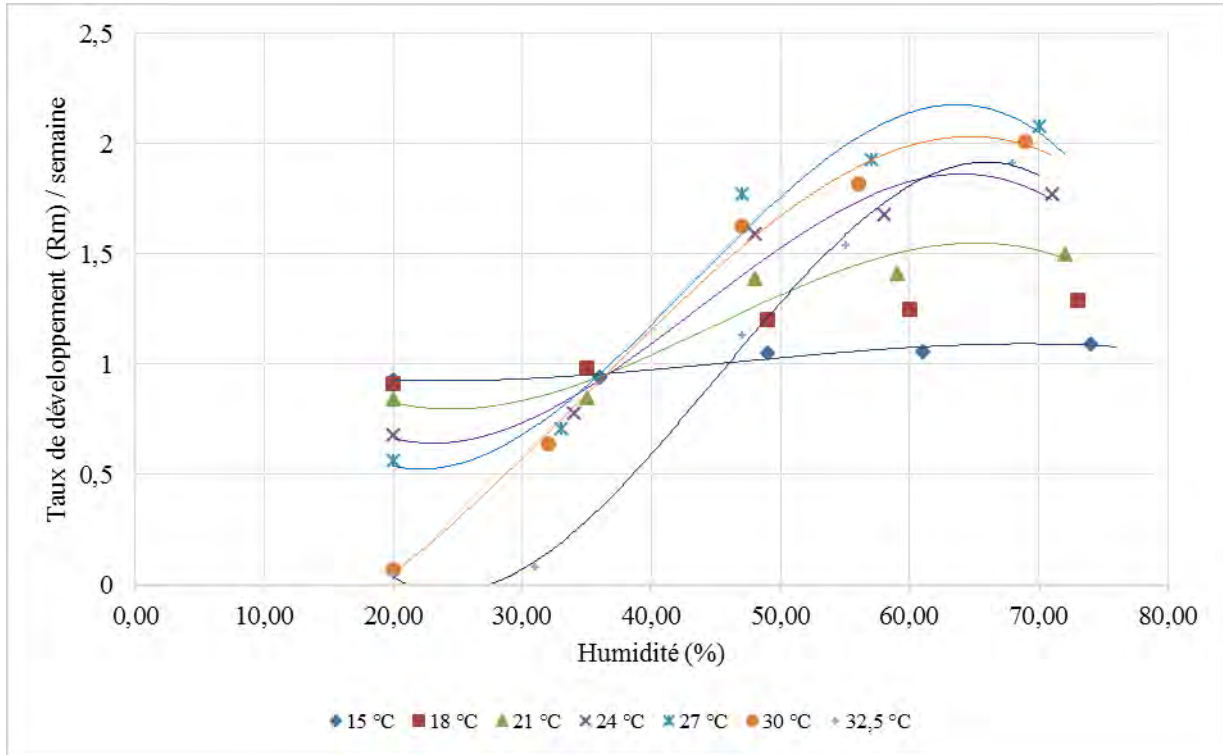


Figure 16 : Taux de développement du charançon en fonction de l'humidité du grain (source [130])

4.2. Les exigences de représentation thermique du silo

Comme nous l'avons précisé dans le premier chapitre, les insectes sont des agents des plus redoutables causant des dégâts dans les entrepôts à grains. L'humidité et surtout la température représentent le facteur crucial influant sur le développement et la croissance de ces espèces nuisibles. La maîtrise de la température des silos est une exigence fondamentale compte tenu de l'accélération qui caractérise la croissance des insectes aux températures élevées.

En France, le scénario type se déroule en deux grandes étapes :

- Les grains sont stockés après la récolte à des niveaux de températures estivales, au-delà de 30°C, et refroidis progressivement si la cellule est équipée en s'appuyant sur le refroidissement de l'air environnant, pendant l'automne. En pratique, on applique une ventilation forcée, automatique ou manuelle, chaque fois que la température est à quelques degrés en dessous de la température du tas de grain (-5°C généralement). On peut ainsi jusqu'aux mois de avril-mai, mettre le grain entre 4°C et 12°C, niveau où la croissance des insectes est quasi nulle.
- A partir du mois de mars, la température extérieure devient plus importante que celle du grain et donc, le grain se réchauffe. Progressivement, le risque grandit d'une multiplication des

insectes jusqu'à arriver à une concentration d'insectes intolérable pour la vente : c'est cette étape que nous souhaitons surveiller.

Notre idée est de faire une surveillance préventive, c'est à dire se donner les moyens d'alerter les opérateurs de l'imminence d'une infestation probable. Pratiquement, cela revient à :

- construire un modèle thermique d'un point de mesure à l'intérieur du silo : **il faut souligner que ce qui nous intéresse n'est pas une modélisation thermique du silo mais plus précisément une modélisation de la température des points du silo où l'on dispose d'une mesure de la température et donc de la température T_g du grain environnant ;**
- construire un modèle prédictif de la température de ce point de mesure allant de la date de mesure jusqu'à l'enlèvement du grain : Nous allons nous appuyer sur les prévisions météorologiques et au-delà, sur des données historiques par exemple le tableau des températures saisonnières moyennes ;
- utiliser ces données et cette modélisation thermique pour actionner le modèle biologique qui va calculer la progression de la population des insectes et anticiper la période temporelle probable d'une infestation galopante ;
- concevoir une interface opérateur qui, jour après jour, donne l'accroissement du niveau de risque d'infestation et la date probable d'une infestation critique.

Voyons tout d'abord les grandes lignes du cahier des charges de cette fonction de surveillance :

- le cycle de reproduction des insectes est d'environ 20 jours (dans les conditions les plus favorables), ce qui fixe la précision prédictive du système. Il faut être capable d'anticiper de 20 jours les dates de danger et de lancer une alerte « rouge » ;
- la mise en œuvre de cette surveillance suppose de connaître la concentration initiale d'insectes lors du démarrage de l'étape 2 décrite ci-dessus : nous considérerons un chiffre de 1 insecte par tonne, généralement admis pour caractériser une récolte saine,
- nous baserons ce travail de modélisation sur un objectif de détection « danger » à un niveau de concentration de 2 insectes par 10 kilos (seuil de sauvegarde), ce qui correspond à une multiplication par 200 du nombre d'insectes et 2 à 3 cycles complets de reproduction.

L'objectif est donc à un cycle complet près (20 jours) de déclencher une alerte « danger », avant que les détecteurs de présence ne donnent l'alerte au taux de 1 insecte par kilo.

Pour appliquer une modélisation prédictive des risques de croissance des insectes, il faut donc disposer de données sur la répartition de la température et de l'humidité dans le tas de grains du silo ; dans la mesure courante, ces données sont obtenues par des capteurs placés dans le tas de grain. Pour le volet essentiel de la prédiction des risques, il faut s'appuyer sur les données de prédiction météorologiques.

Nous proposons ici de nous appuyer sur les prédictions de court et long terme (0-15 jours) fournies par la météo et de nous appuyer sur les moyennes statistiques historiques des données annuelles.

La température est le paramètre, classiquement, le plus surveillé dans une cellule de stockage. Afin de mettre en œuvre notre proposition de modèle prédictif, la modélisation du comportement thermique de la cellule de stockage est indispensable. Plusieurs travaux de modélisations ont été réalisés afin de proposer des modèles plus ou moins affinés du comportement thermique des stocks de grain [134]. Notre ambition n'est pas celle-là et nous devons considérer la réalité système de notre démarche. Dans SILOCARE des capteurs de températures sont répartis dans le tas de grains qui donnent l'évolution de la température d'un « point » de ce tas de grains. Notre besoin est donc plus simplement de pouvoir précisément extrapoler cette mesure dans les mois qui suivent pour évaluer :

- Les risques d'infestation ;
- Le délai de survenue de cette infestation.

Pour prédire, dans une vision SILOCARE, l'évolution de la température du « point de mesure », nous proposons d'appliquer un modèle linéaire simple réalisant la fonction $T(t)$ (Équation 6), prenant en compte l'environnement dans lequel il est appliqué et intégrant les paramètres spécifiques de chaque type de grain surveillé et de chaque type de cellule.

4.2.1 Le modèle thermique du silo

Rappelons les deux objectifs du modèle :

- servir la modélisation biologique en apportant, à tous instants et en tous points surveillés, la prévision de température du silo qui va conditionner essentiellement la vitesse de croissance des insectes ;
- servir la détection des anomalies se caractérisant par une élévation locale ou générale de la température du grain : il y a dans la mesure de température un objectif sécuritaire, en plus de l'objectif de prévenir le développement des insectes.

Nous avons fortement souligné que la construction d'un modèle thermique ne concerne que le « point de mesure » et non la cellule toute entière. La modélisation complète de la cellule de stockage reste évidemment utile pour définir les zones à risques où les températures vont s'élever le plus et elle nous est utile pour valider notre modèle simplifié d'évolution du point de mesure.

4.2.2 La simulation COMSOL

Nous avons donc considéré un cas d'école et l'avons simulé sur le logiciel 3D *COMSOL Multiphysics* qui offre la possibilité de combiner différents modèles physiques avec une résolution de problèmes par la méthode des éléments finis. La Figure 17 représente notre modèle de simulation 3D. Partons d'une

température initiale $T=10^{\circ}\text{C}$ (température moyenne des stocks de grain), nous appliquons une température extérieure de 35°C et nous suivrons par la suite, l'évolution de celle-ci au sein de la cellule de stockage sur une période de 6 mois.

Dans cette simulation nous avons considéré qu'il n'y a pas d'activité respiratoire du grain afin de ne pas prendre en considération la chaleur dégagée par cette activité.

Le modèle physique choisi pour cette simulation est l'équation de transfert de la chaleur dans les solides par conduction.

$$\lambda \Delta T = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

- ∂T la variation de température dans un temps ∂t ;
- λ conductivité thermique ;
- ρ masse volumique ;
- C capacité calorifique ;

Les valeurs des différents paramètres utilisés pour la simulation sont celles disponibles dans les tables de simulation de COMSOL en ce qui concerne le Béton. Pour le grain, nous avons pris les valeurs que nous avons pu trouver dans la littérature [135], ces valeurs sont rappelées dans le Tableau 6.

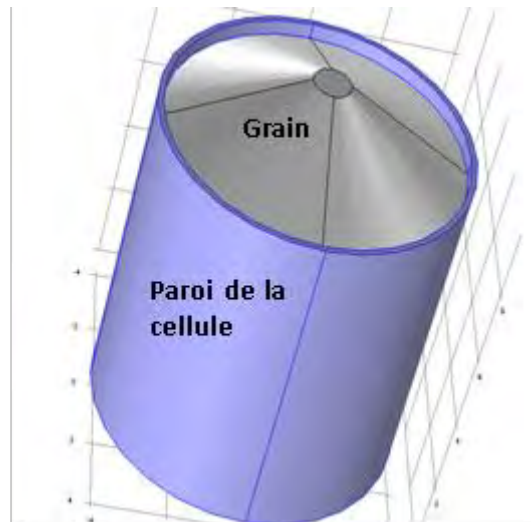


Figure 17 : La structure 3D simulée sous COMSOL

Matériaux	C (J/Kg.K)	λ (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)	Dimension
Blé	2050	0.16	770	8 m (Diamètre)
Béton	880	1.8	2300	20 cm (épaisseur)

Tableau 6 : Propriété des matériaux du système simulé

La simulation réalisée permet de voir dans le temps, le comportement thermique du grain stocké. Nous avons choisi 6 mois comme période de stockage, cette période est découpée en semaine afin de pouvoir suivre l'évolution de la température dans le grain en tous points, semaine après semaine. La Figure 18 présente le résultat de la simulation 3D suite à l'exposition de la cellule de stockage à une température de 35°C.

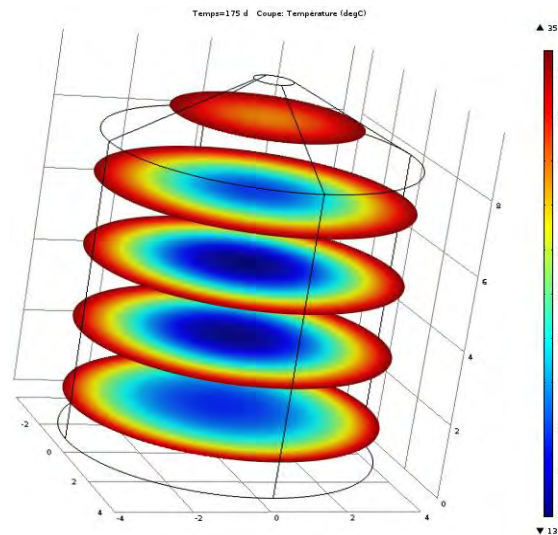


Figure 18 : Comportement thermique du grain après une exposition de 6 mois à une température de 35°C

Comme le montre la Figure 18, l'évolution naturelle de la température par conduction au sein du grain est un phénomène très lent, ceci réconforte l'idée de pouvoir linéariser ce modèle pour traiter de l'évolution de la température du point de mesure.

Les Figure 19 et Figure 20 présentent un résultat type de simulation obtenu. On constate, suivant les coordonnées choisies pour les points de mesure, que les constantes de temps d'évolution sont de plusieurs jours à plusieurs mois et que les variations thermiques sont de l'ordre du millième de degré par jour.

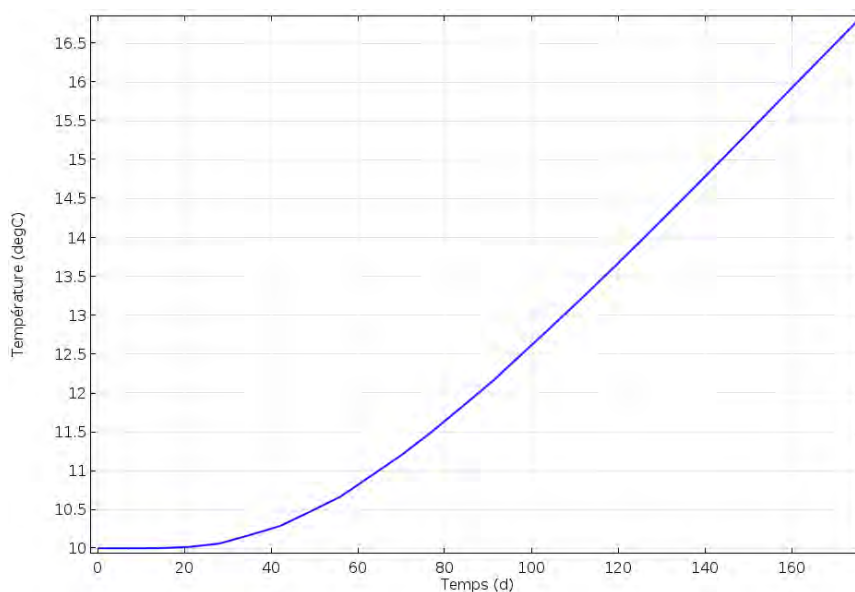


Figure 19 : Evolution de la température en fonction du temps (point 2,5 m)

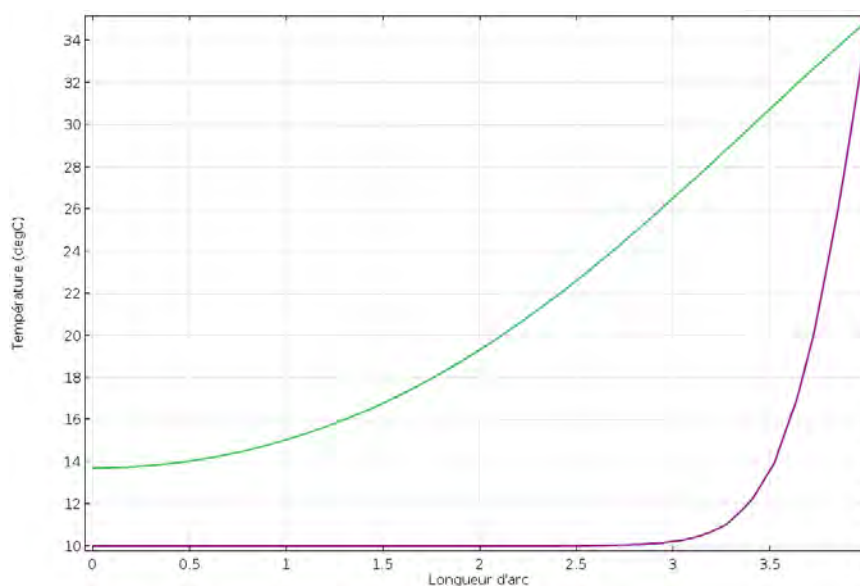


Figure 20 : Distribution de la température en fonction de la distance de la paroi
 — après une semaine d'exposition à une température de 35°C
 — après 6 mois d'exposition

4.2.3 Modélisation de l'évolution du point de mesure

Les résultats de cette simulation COMSOL invitent à :

- modéliser sur un découpage temporel d'une semaine afin que le modèle thermique reste en complète concordance avec le modèle biologique de croissance choisi ;
- faire une approximation linéaire pour la modélisation du point de mesure suivant l'Équation 5.

$$\partial T = k s (T_g - T_a) \partial t \quad \text{Avec } k = \frac{\lambda}{\rho C} \quad \text{Équation 5}$$

Où :

- ∂T la variation de température dans un temps ∂t ;
- T_g la température du grain à l'instant t_n ;
- T_a la température ambiante moyenne pendant la durée ∂t ;
- λ conductivité thermique ;
- ρ masse volumique ;
- C capacité calorifique ;
- s le coefficient d'auto adaptation du modèle ;

$$T(t_{n+1}) = T(t_n) - \partial T(t_n) \quad \text{Équation 6}$$

$T(t_{n+1})$ représente la température du grain à l'instant t_{n+1} c'est-à-dire la température du grain prévue au bout d'une semaine une semaine.

4.2.4 La procédure d'apprentissage des paramètres caractéristiques du silo dans la modélisation du point de mesure

Ce qui nous voulons c'est prédire l'évolution de la température T_g pour tous les points surveillés par les capteurs répartis, en fonction de la température extérieure et des prévisions météorologiques de son évolution. Pour ce faire, il nous faut être capable, pour chaque silo et connaissant la position du capteur dans le tas de grain, de calculer la valeur des paramètres « vrais » le caractérisant. Nous proposons d'utiliser des techniques élémentaires d'apprentissage en cyclant des prédictions pas à pas et en corrigeant progressivement la valeur des paramètres jusqu'à aboutir à une parfaite identification entre données courantes et données prédites.

Compte tenu des évolutions de la température ambiante T_a qui monte le jour et baisse la nuit, nous proposons de prendre une mesure de température toutes les heures afin d'avoir une vraie moyenne de cette mesure. Sur une durée ∂t égale à une semaine, nous calculons la moyenne des températures prédites, en un premier temps. En second lieu, nous calculons également la moyenne des températures enregistrées pendant la semaine précédant le jour j . Pour ce faire, nous avons fait recourt au site internet <http://stationmeteo.meteorologic.net/> qui propose des prédictions de température allant jusqu'à 17 jours. La température ambiante réelle et celle du grain sont enregistrées par nos sondes qui seront présentées plus loin dans ce chapitre.

$$T_a \text{ Moyenne sur une semaine des } T_a \text{ heure par heure} = dtg1 + dtg2 + \dots dtg 240$$

$$\text{Avec :} \quad \partial T = k s (T_g - T_a) \partial t$$

L'apprentissage consiste à recalculer « s » initialement égale à 1 pour que :

- partant de la mesure : $T_g(t_{n-1})$ on trouve par le modèle, la valeur une semaine plus tard : $T_g(t_n)$ que l'on affine le paramètre « s » sur toutes les périodes d'une semaine qui précèdent la date courante ;
- en utilisant la valeur de « s » pour prédire l'évolution de la température jusqu'à déclencher l'alerte si le seuil est dépassé « rouge ».
- La Figure 21, en prenant comme référence les températures issues du modèle COMSOL, présente notre modèle auto adaptatif. Nous pouvons observer la régulation du paramètre d'apprentissage au fur du temps qui présente de grandes fluctuations dans les premières itérations (une par semaine) puis se stabilise au bout d'un peu plus de deux mois. L'apprentissage comme évoqué dans les précédents paragraphes, se fait sur la tangente de la courbe de température. Il est possible d'envisager un recalage de la température du modèle sur les anciennes températures réelles enregistrées.
- Cette démarche d'apprentissage est illustrée dans la Figure 22.

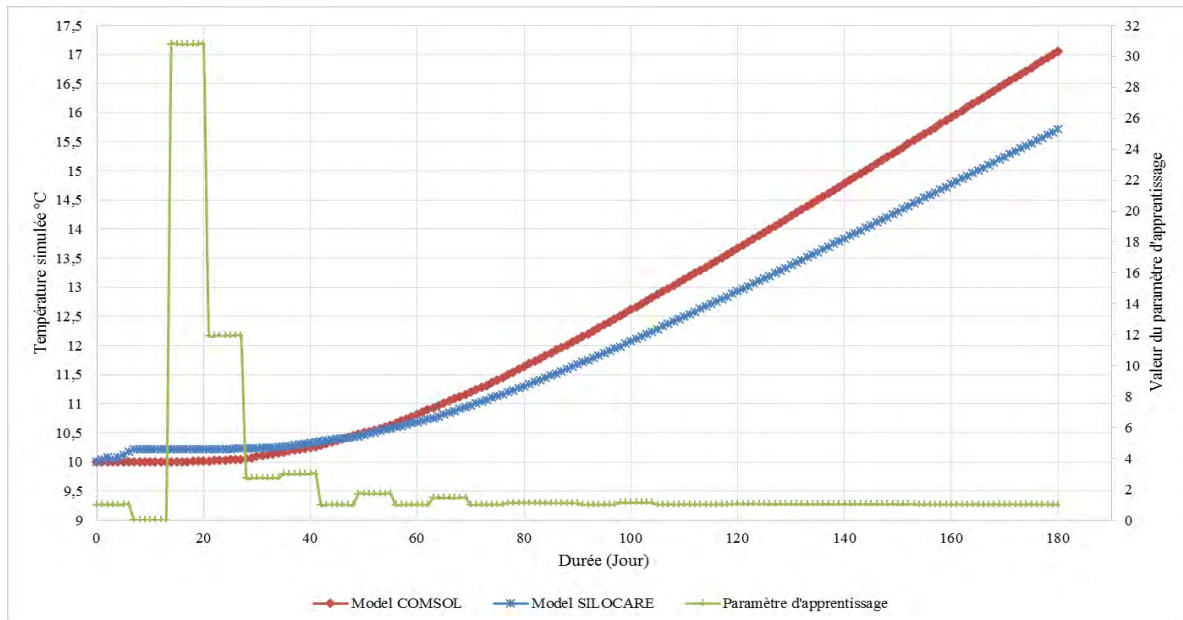


Figure 21 : Apprentissage du modèle thermique de la cellule de stockage

4.2.5 Utilisation du modèle thermique dans la conception d'un détecteur de la présence d'insectes

L'idée est de réaliser cette détection en mesurant l'écart entre la valeur de la donnée prédite et la valeur courante. La technique d'apprentissage va être mise au service de l'évaluation de T_g . Dans la vision sécuritaire, il s'agit de comparer l'écart prédit à une semaine par le modèle thermique, et l'écart mesuré par le capteur placé au point de mesure : si la comparaison de cet écart indique une surchauffe, il faut en conclure qu'il y a un point chaud autour du point de mesure que l'on peut interpréter comme une infestation, ou comme une élévation anormale et dangereuse de la température

locale. Cette procédure est réitérée chaque jour, tout en prenant en compte des données de la semaine précédente.

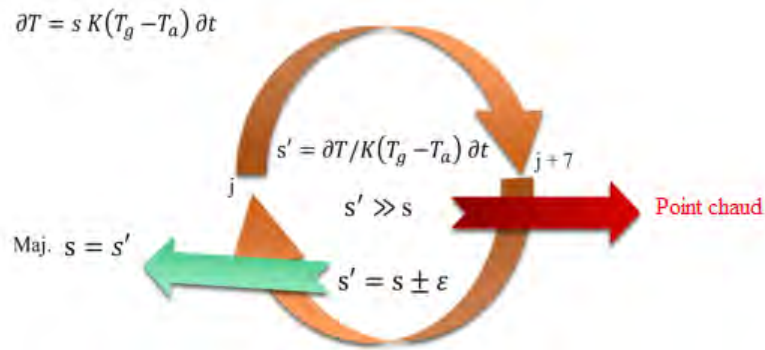


Figure 22 : Apprentissage du paramètre thermique S et la détection d'un point chaud

5. Les choix du système de détection de la présence d'insectes

Nous rappelons que notre système SILOCARE comporte trois modules complémentaires (prévention, détection et traitement). Dans la partie précédente la conception du module « prévention » a été détaillée ; nous présenterons ici la composante « détection ».

Nous venons de voir que le capteur de température peut être, en exploitant l'idée de modèles prédictifs, utilisé pour la détection de la présence d'insectes. On peut de cette manière tirer le meilleur parti des pratiques existantes qui font que la mesure de température est systématiquement présente dans les silos et indispensable pour des raisons sécuritaires (point chauds). Le grain (blé, riz, maïs,...) constitue un parfait isolant thermique [134], notamment dans le cas de grandes quantités comme celles stockées dans les silos. La détection d'un échauffement local par les sondes thermométriques est donc possible avec des limites. Cette bonne isolation thermique du grain limite la portée de la détection et implique des délais de détection qui peuvent être importants (afin qu'une mesure de température puisse détecter un point chaud, celle-ci doit être effectuée à environ 0,5 m de ce point) [136]. L'évidence, pour une bonne sécurisation du silo, est de multiplier les points de mesures de la température. Nous proposons d'exploiter cette perspective aussi dans l'objectif de détection des insectes en appliquant le concept présenté en 4.2.1: **greffer sous forme de logiciels la modélisation des points de mesures et la fonction détection par apprentissage tel que nous venons de le présenter.**

Notre objectif est maintenant d'identifier les autres possibilités de capteurs-détecteurs de présence et d'évaluer leur capacité à être intégrés dans un système de mesures embarquées.

5.1. Détection de présence par la détection de CO₂

Plusieurs études montrent que la concentration de CO₂ représente une variable pertinente quant à la surveillance de la santé du grain [112], [137]–[139]. L'augmentation de la concentration de CO₂ peut être provoquée par différents phénomènes :

- La respiration du grain, les moisissures, les acariens [140]. Le développement des moisissures qui produisent de grandes quantités de CO₂ est fortement lié au taux d'humidité du grain entreposé. Au-delà de 75% d'humidité relative (à l'équilibre), d'importants développements des moisissures sont observés [137].
- Les insectes produisent à eux seuls en moyenne 1 µl de CO₂ par minute [138]. Cela suppose que dans le cas où le taux d'humidité n'est pas trop élevé (taux), la détection des insectes devient envisageable par mesures cumulatives du taux de CO₂ [138].

L'intérêt théorique pour la mise en œuvre de capteurs de CO₂ est que, le CO₂ étant plus lourd que l'air, aura tendance à s'accumuler en fond de silo. Dans notre démarche SILOCARE, cela revient à préconiser de placer un capteur de CO₂ en fond de silo ; c'est la détection non spécifique mais la plus sensible et donc la plus précoce que l'on peut envisager aujourd'hui. Plusieurs études théoriques et pratiques semblent montrer, en situation réelle, que le CO₂ diffuse le plus vers le bas mais aussi dans toutes les directions, contrairement à ce que l'on peut penser du fait que le CO₂ est plus lourd que l'air [141], [142]. Cela nous invite, dans cette étape de recherche, à répartir, pour la démonstration SILOCARE, des capteurs de CO₂ sur toute la hauteur du tas de grains (voir SILOTEST 3).

Considérons maintenant un cas pratique d'application. Pour que le grain soit commercialement acceptable, il ne doit pas contenir plus de 2 insectes par 10 Kg : Prenons le cas de 1 insecte/10 Kg. La masse volumique du blé est de 770 Kg/m³ donc 0,77 Kg/l donc pour 1 Kg on a 1,3 L. Un insecte produit 1 µl de CO₂ /min donc 1440 µl/jour, c'est-à-dire la concentration du CO₂ (naturellement à 350 ppm) atteint 1100 ppm par litre, ce qui est largement détectable avec les capteurs de CO₂. La détection de la présence d'insectes par CO₂ est donc une approche très attractive. Les résultats de la littérature montrent que dans un silo, le taux de CO₂ produit par les insectes se cumule principalement dans la colonne centrale de la cellule de stockage [141]. Pratiquement, des capteurs de CO₂ fonctionnant sur le principe d'absorption de rayonnement infrarouge (4200-4300 nm) existent dans le commerce et peuvent réaliser des mesures sensibles et fiables (± 50 ppm) et des sensibilités compatibles (300 ppm).

5.2. Détection de la présence d'insectes par sonde acoustique

Les insectes produisent un bruit lors du grignotage du grain. Malgré la difficile propagation du bruit dans le grain [143], la détection du bruit de grignotage donne est une information très pertinente car elle permet la **détection des insectes à l'état larvaire** : parmi les méthodes à explorer dans le champ de la détection « au plus tôt » de la présence des insectes, il y a donc la détection acoustique. Cette

option a fait l'objet de plusieurs études et ce, depuis plus de 30 ans, avec des réussites plus ou moins satisfaisantes [90], [94], dont certaines ont abouti à des systèmes commercialisés.

Dès l'origine du projet ECOSILO, la détection acoustique était pressentie comme dispositif privilégié de détection: une sonde conçue par l'entreprise SYSTELIA pour être « plantée » en haut du tas de grains, devait être validée dans cette fonction. En fait, d'autres exigences ont fait que cette voie de surveillance ne s'est pas avérée suffisante et qu'il fallait imaginer une sonde acoustique miniaturisée pouvant être implantée partout dans le tas de grains. Nous avons donc engagé un travail de conception d'une telle sonde miniaturisée associée à des algorithmes de détection. Nos objectifs sont : une détection sensible et rapide et une capacité à distinguer les insectes adultes et les larves, ainsi que la différenciation entre les espèces d'insectes. L'algorithme développé est présenté ci-après :

Notre approche méthodologique repose sur la reconnaissance d'un certain nombre de caractéristiques propres au bruit produit par l'insecte dans un signal enregistré au sein du grain ; nous devons ensuite « apprendre » les caractéristiques les plus pertinentes, les plus significatives et établir une classification pour systématiquement pouvoir identifier l'origine du bruit. La Figure 23 illustre ce cheminement en deux étapes :

- une première étape d'apprentissage ;
- une deuxième étape de classification.

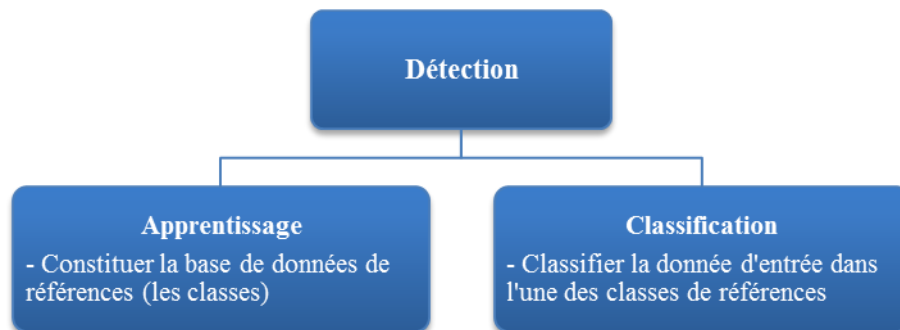


Figure 23 : Etapes de détection acoustique

5.2.1 L'étape d'apprentissage

Dans la Figure 24, nous présenterons, le détail de la démarche retenue pour notre méthode de détection acoustique que nous allons détailler pas à pas :



Figure 24 : Le processus de la détection acoustique

5.2.1.1 Prétraitement

Une première caractéristique du signal des insectes est un signal généré entre 800 Hz et 4,2 KHz [94] ; une deuxième caractéristique c'est que c'est un signal bref à caractère impulsionnel. Notre démarche est construite sur un filtrage de la bande utile et une extraction automatique des « signatures » contenues dans le signal résiduel.

a. Le filtrage numérique

Le signal acoustique généré par l'insecte est brouillé par des bruits parasites : bruits électroniques et surtout bruits de l'environnement, etc. Connaissant la bande de fréquences utiles, le filtrage du signal s'impose à l'aide d'un filtre passe-bande. Ce filtrage préliminaire n'est évidemment pas suffisant car nous avons aussi du bruit dans la bande de fréquence de filtrage : nous avons exploré plusieurs méthodes pour extraire les signaux utiles: la soustraction spectrale, le filtrage de Wiener, MMSE, les méthodes à sous-espace, et avons retenu la méthode de l'erreur quadratique moyenne (MMSE).

b. Méthode de l'erreur quadratique moyenne (MMSE)

C'est une technique de débruitage adaptée pour des méthodes d'extraction de signatures se basant sur la magnitude spectrale très utilisée dans le milieu musical.

Afin de présenter brièvement la méthode MMSE, nous considérons dans ce qui suit que le signal bruité $y[n]$ se compose du signal propre $x[n]$ (signal propre) et du bruit additif $d[n]$.

L'estimateur MMSE est une méthode qui se base sur l'estimation statistique : à partir d'un ensemble de mesures dépendant d'un paramètre inconnu, nous souhaitons trouver un estimateur de ce paramètre d'intérêt. Dans l'application débruitage, les mesures correspondent à l'ensemble des coefficients TFD du signal bruité (spectre du signal bruité), les paramètres d'intérêt représentent l'ensemble des coefficients TFD du signal original (spectre du signal sans bruit). **L'estimateur MMSE est l'estimateur optimal qui minimise l'erreur quadratique moyenne (MMSE) entre la magnitude spectrale estimée et la magnitude spectrale réelle du signal propre [143].**

$$e = E \left\{ (\hat{X}_K - X_K)^2 \right\} \quad \text{Équation 7}$$

Où :

- \hat{X}_K : la magnitude spectrale estimée à la fréquence K du signal propre;
- X_K : la magnitude spectrale réelle à la fréquence K du signal propre.

En cherchant l'erreur minimale de l'Équation 6 précédente par rapport au \hat{X}_K , on obtient l'estimateur MMSE optimal sous la forme d'une fonction de gain spectral suivant :

$$\hat{X}_K = G(\xi_K, \gamma_K) Y_K \quad \text{Équation 8}$$

A partir de l'Équation 8, on trouve que la magnitude spectrale estimée du signal propre \hat{X}_k est égale au produit de la fonction de gain G et la magnitude spectrale du signal bruité Y_k . La fonction de gain G dépend fortement la valeur du rapport signal sur bruit (RSB) a priori ξ_k . Dans les zones sans signal utile, les valeurs de RSB a priori ξ_k sont petites, on obtient des valeurs petites de G (fortes atténuations). Inversement, pour les zones où le signal utile est présent, les valeurs ξ_k sont plus grandes, la valeur de G tend vers 1. La dépendance de la fonction de gain du paramètres ξ_k est présentée dans l'annexe A.

5.2.1.2 L'approche par segmentation

Le traitement du signal est très gourmand en matière de temps de calcul : afin de réduire au minimum ce temps de calcul, le signal à traiter doit être segmenté en petits morceaux, contenant des impulsions qui représentent le bruit généré par l'insecte. Cela implique la détection de ces impulsions.

Dans le domaine temporel, l'amplitude des impulsions produites par l'insecte est plus importante que le bruit de fond, c'est-à-dire que l'énergie dans les segments contenant des impulsions est élevée. Chaque segment peut être composé par un ou plusieurs sous-segments vérifiant la condition de l'Équation 11. La segmentation est basée sur un détecteur d'activité d'insectes, qui estime l'énergie pour chaque sous-segment :

$$E(k) = \sum_{i=1}^N (x(kL + i))^2 \quad \text{Équation 9}$$

Où :

- x le signal prétraité ;
- k l'indice du segment ;
- L la taille de la fenêtre de décalage ;
- N la taille de sous-segment.

Afin de décider si un segment contient ou non des impulsions, nous avons défini un seuil s (voir l'Équation 10). Si l'énergie du segment est supérieure à seuil s , nous considérons que le sous-segment contient un bruit qui pourrait être émis par un insecte et nous mettons la valeur du vecteur détecteur D à 1, pour le cas contraire 0. Le seuil est calculé suivant l'Équation 10 suivante :

$$s = \text{mean}(E(k)) + \sigma(E(k)) \quad \text{Équation 10}$$

L'équation suivante montre la méthode de détection de sous-segment avec un signal utile :

$$\text{Détecteur } D(k) = \begin{cases} D(k) = 1 & \text{si } E(K) > s \\ D(k) = 0 & \text{si non} \end{cases} \quad \text{Équation 11}$$

Un segment est construit à partir des sous-segments successifs marqué 1.

La Figure 25 montre un exemple de segmentation du signal :

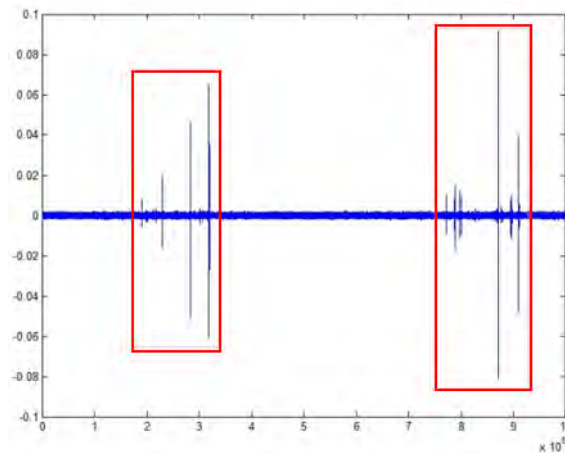


Figure 25 : La segmentation du signal

La longueur des sous-segments dépend de la taille de N ainsi que de la taille de la fenêtre de décalage L . Nous avons choisi la valeur de 1024 échantillons pour N , et 30 pour L . Ce choix a été fait suite aux essais que nous avons menés et qui correspondent aux meilleurs résultats liés à la segmentation du signal, ainsi qu'au temps de calcul.

5.2.1.3 Méthode d'extraction de la signature acoustique

Une étape indispensable pour tout système de détection acoustique est l'extraction de signatures caractérisant le signal ciblé. Cela nous renvoie à explorer les méthodes de traitement du signal appropriées.

La méthode TFD est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'analyse spectrale. Elle représente la distribution de l'énergie du signal dans des intervalles de fréquence. Une limite majeure de cette méthode est due au fait qu'elle ne s'applique correctement que pour l'analyse spectrale des signaux stationnaires, les signaux dont le spectre ne varie pas dans le temps. Cependant, cet outil présente de nombreuses limitations quant à son application sur des signaux non-stationnaires. Dans le cas d'un signal non stationnaire, l'information temporelle de la composante fréquentielle du signal est perdue, c'est-à-dire, il n'est pas possible de localiser l'apparition d'une fréquence donnée dans le temps. La solution à ce problème est d'utiliser les outils d'analyse temps-fréquence ou d'analyse temps-échelle.

Pour ce faire, nous nous sommes tournés vers une méthode temps-fréquence, qui est MFCC. **La méthode MFCC pour (Mel-Frequency Cepstrum Coefficient) est très largement utilisée dans le domaine de la reconnaissance automatique de la parole [144].** C'est une méthode qui se base sur la transformée de Fourier à court terme STFT (Short-Time Fourier Transform). La Figure 26 détaille le fonctionnement de MFCC. Cette méthode consiste en l'extraction de coefficients caractérisant le signal traité[145].



Figure 26 : Processus de calcul des coefficients MFCC

a. Fragmentation et Fenêtrage

Afin de pouvoir utiliser les outils d'analyse des signaux stationnaires, le signal est divisé en plusieurs fragments. Le signal est donc considéré dans chaque fragment (20-40 ms) comme étant localement stationnaire. Si la taille de la fenêtre est trop courte, elle ne peut contenir suffisamment d'échantillons pour obtenir une estimation fiable du spectre. Inversement, si la taille de fenêtre est trop grande, elle n'assure plus l'hypothèse que le signal soit stationnaire [146]. Les fragments utilisés se recouvrent pour permettre une transition lisse d'un frame à l'autre.

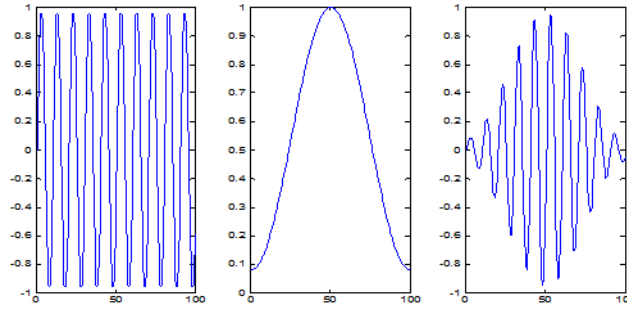


Figure 27 : Fenêtrage par la fenêtre Hamming

La fragmentation d'un signal en plusieurs morceaux produit un effet de bord à cause d'une discontinuité du signal aux frontières de ces fragments. Ceci présente des « spectres parasites » qui affectent la précision de spectre du signal (des lobes secondaires). Afin de limiter l'impact de l'effet de bord, nous pouvons utiliser l'une des différentes fenêtres développées à cet effet comme Hanning, Hamming, Blackman, etc. Dans le traitement de la parole au quel nous nous référons, on utilise le plus souvent la fenêtre Hamming qui pallie le mieux le problème des « spectres parasites » et augmente la précision du spectre du signal.

- b. Après la fragmentation et le fenêtrage, la transformée de Fourier est appliquée sur chaque fragment afin d'obtenir ses composantes fréquentielles. Cela permettra de connaître la distribution de l'énergie du signal sur chaque intervalle de fréquence :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{\pi}{N}kn} \quad \text{Équation 12}$$

c. Application de l'échelle de Mel :

Le principe d'échelle de Mel est inspiré du fonctionnement de l'oreille humaine qui n'est pas sensible de la même manière à toutes les bandes de fréquences [147] ; elle ne peut pas discerner entre deux fréquences rapprochées d'une part et elle est moins sensible à des fréquences plus élevées (supérieure 1kHz). Cette étape vise à affiner la résolution fréquentielle en se rapprochant de celle de l'oreille humaine. L'échelle de Mel est approximativement linéaire en dessous de 1 kHz et logarithmique (ou non linéaire) au-dessus 1 kHz [147]. La formule pour la conversion de fréquence à l'échelle Mel est la suivante :

$$M(f) = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad \text{Équation 13}$$

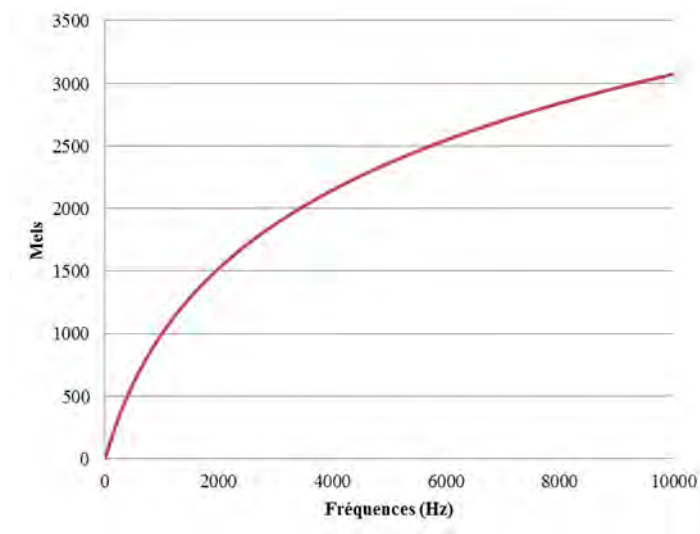


Figure 28 : Echelle de Mel

Dans la pratique, on applique le banc de filtres suivant l'échelle de Mel sur le spectre du signal. Plus les fréquences sont hautes, plus les filtres sont larges. Une illustration du banc de filtres est représentée sur la Figure 29

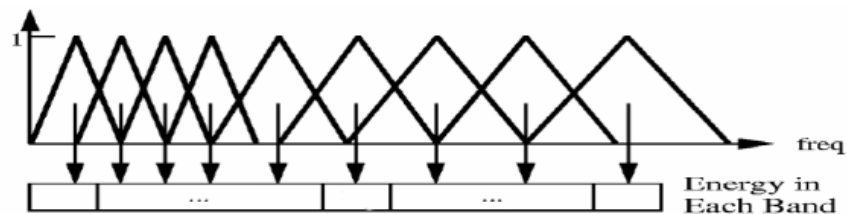


Figure 29 : Le banc de filtres selon l'échelle Mel

Chaque sortie de filtre représente la somme des composantes spectrales comprises dans la bande du filtre. Après cette étape, on obtient un spectre plus fin selon l'échelle de Mel. Cela permet de réduire la dimension ou la taille du spectre, cette technique peut être décrite comme une compression de la taille

des composantes spectrales en un nombre égal à celui des filtres du banc. La Figure 30 illustre cette compression.

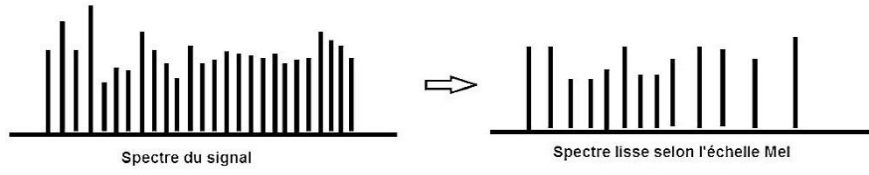


Figure 30 : Spectre lisse selon l'échelle Mel

d. Application d'une échelle logarithmique

La perception humaine est sensible à l'intensité sonore selon une échelle logarithmique. C'est pour cette raison qu'après avoir les énergies des sorties de banc de filtres (le spectre du signal selon l'échelle de Mel), nous appliquons le logarithme sur ces énergies. Le logarithme compresse la gamme dynamique de valeurs, il est moins sensible aux légères variations de l'entrée.

e. Transformation cosinus discrète (DCT)

Le logarithme de spectre du signal est considéré comme un « nouveau signal ». La DCT qui est utilisée dans les systèmes de compression d'image (JPEG, MPEG) possède la propriété de regroupement de l'énergie. En général, les fortes amplitudes dans les basses fréquences, et les faibles amplitudes dans les hautes fréquences. L'information est essentiellement portée par les coefficients de basses fréquences [148].

$$C[k] = \sum_{m=1}^M \log|Y(m)| \cos\left(k(m - 0.5)\frac{\pi}{M}\right), k = 0, \dots, J \quad \text{Équation 14}$$

Où :

- M : nombre de filtres ;
- Y(m) : l'énergie de sortie du filtre n° m.

À partir de la formule, le premier coefficient C_0 où $k=0$ est égal à :

$$C[0] = \sum_{m=1}^M \text{Log}(|Y(m)|) \quad \text{Équation 15}$$

On constate que le coefficient C_0 est la somme des logarithmes des énergies des sorties du banc de filtres qui est proportionnel à l'énergie du signal. Ce coefficient dépend des conditions d'enregistrement du signal. C'est pour cette raison qu'il n'est pas pris en compte. La méthode MFCC n'utilise que les 12 premiers coefficients (C_2 - C_{13}) comme signature du signal. Comme les coefficients DCT plus élevés représentent des changements rapides dans les énergies du banc filtres ces derniers ne sont pas non plus pris en compte, car dégradent les performances du système de reconnaissance [146].

5.2.2 Classification et détection de signatures

Dans l'étape précédente, nous avons présenté notre méthode d'extraction des caractéristiques propres du signal d'insecte. Ces caractéristiques doivent ensuite être utilisées comme les données d'entrée pour le modèle de classification. Le but de cette étape est de répartir des objets ou des individus (dans notre cas les signatures acoustiques) dans différents groupes de façon automatique. Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature pour réaliser cette fonction comme le réseau neurone, machine à vecteurs de support (SVM), modèle de mélanges de gaussiennes (GMM), etc.

GMM (Gaussian Mixture Models) est un outil puissant pour l'estimation de la densité, la classification non supervisée (clustering) et la classification supervisée (l'analyse discriminante) [149].

Dans cette méthode, les données à traiter sont supposées représenter plusieurs sous population dont chacune des sous-populations est modélisée par une loi de densité séparée. La population totale est un mélange de ces sous-populations d'où le modèle résultant qui modélise l'ensemble des données est le modèle de mélange de loi de probabilité. La Figure 31 présente un exemple de modèle de mélange de gaussiennes (verte et rouge), dont les données appartiennent à deux sous-populations. La densité de probabilité du mélange (noire) modélise la totalité des données.

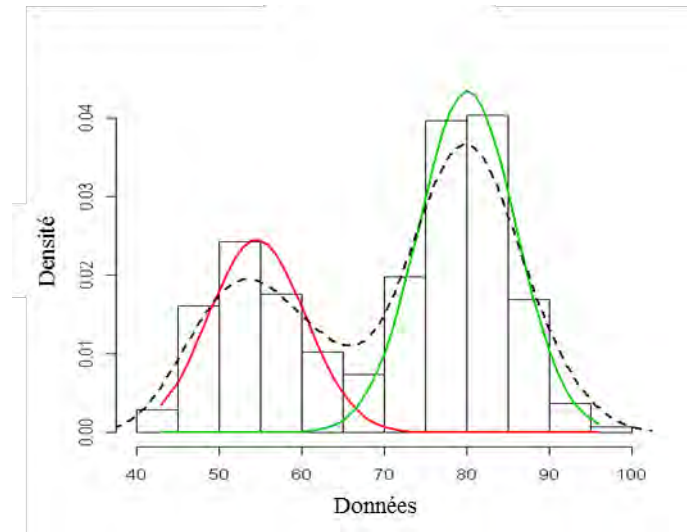


Figure 31 : Exemple de modèle de mélange gaussienne (une dimension)

5.2.2.1 Définition d'un modèle de mélange

Les observations multidimensionnelles $x = (x_1, \dots, x_n)$ dans \mathbb{R}^d sont supposées être un échantillon d'un mélange de densités de probabilité de K composantes :

$$f(x; \theta) = \sum_{k=1}^K \pi_k f(x; \alpha_k) \quad \text{Équation 16}$$

Où :

- π_k : les proportions de mélange ($0 < \pi_k < 1$ et $\sum_{k=1}^K \pi_k = 1$) ;
- $f(x; \alpha_k)$: les densités des composantes.

Le modèle de mélange est un modèle à données incomplètes. Les données complétées sont représentées par l'Équation 17 :

$$y = (x, z) = ((x_1, z_1), \dots, (x_n, z_n)) \quad \text{Équation 17}$$

Où :

- Le vecteur $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ représente les données manquantes. Il s'agit de l'ensemble des n vecteurs associés aux n individus $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;
- Chaque vecteur $z_i = (z_{i1}, \dots, z_{iK})$ indique l'appartenance de l'individu x_i à la $k^{\text{ième}}$ composante du modèle ($K^{\text{ième}}$ classe), avec $z_{ik} = 1$ si l'individu x_i provient de la $k^{\text{ième}}$ exclusivement de la composante et $z_{ik} = 0$ sinon.

Pour la classification non-supervisée, le z est une partition inconnue, et nous souhaitons l'estimer. Inversement, dans le cas de la classification supervisée, le couple (x, z) est connu, il s'agit de la base d'apprentissage pour construire la fonction de décision.

5.2.2.2 Classifications non supervisée par modèle de mélange

La classification non supervisée est une approche utilisée lorsqu'on ne connaît pas a priori la répartition des individus dans les classes. L'objectif de cette approche est de trouver la structure de chacune des classes à partir d'un jeu de données. Autrement dit, elle vise à organiser un ensemble d'individus x_i en K classes homogènes.

La méthode de modèles de mélanges associe chaque classe à une composante du mélange [149]. Les individus de la même classe, ont été générés suivant la même loi probabilité. Pour le cas GMM, une classe est représentée par un ellipsoïde correspondant à la densité de probabilité gaussienne. Cette densité est caractérisée par le vecteur des moyennes qui indique le centroïde de la classe et aussi par la matrice de covariance qui traduit la forme de cette classe.

La démarche de classification par le modèle de mélanges est la suivante :

- Estimation des paramètres du modèle $\hat{\theta}$ par l'algorithme EM ;
- À partir des paramètres estimés $\hat{\theta}$, on calcule les t_{ik} , probabilités conditionnelles que l'observation x_i proviennent de la classe K .

$$t_{ik}(\hat{\theta}) = p(z_{ik} = 1 | X_i = x_i; \hat{\theta}) = \frac{\hat{\pi}_k f(x_i; \hat{\alpha}_k)}{f(x_i; \hat{\theta})} \quad \text{Équation 18}$$

En fin, le vecteur z_i (de répartition) peut être obtenu en appliquant le principe de MAP (Maximum A Posteriori), c'est-à-dire l'affectation de l'individu x_i à la classe qui maximise t_{ik} (la classe de plus grande probabilité conditionnelle estimée) [149].

$$\hat{z}_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = \underset{h=1,\dots,K}{\operatorname{argmax}} \hat{t}_{ih}(\hat{\theta}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Équation 19}$$

5.2.2.3 Modèle de mélanges pour la classification supervisés

Contrairement à la classification non-supervisée, la classification supervisée ou l'analyse discriminante a besoin d'une base d'apprentissage. On doit connaître les répartitions des individus dans les classes ou bien la structure de chacune des classes. La base d'apprentissage constitue un échantillon de n couple $(x; z) = \{(x_1; z_1), \dots, (x_n; z_n)\}$, avec des individus x_i et leur indicateur z_i sont déjà connues. À partir de cette base d'apprentissage, on souhaite construire une fonction de décision permettant d'affecter un nouvel individu x_{n+1} à une des classes définies a priori [149].

La classification supervisée par modèle de mélanges est réalisée suivant les deux étapes suivantes :

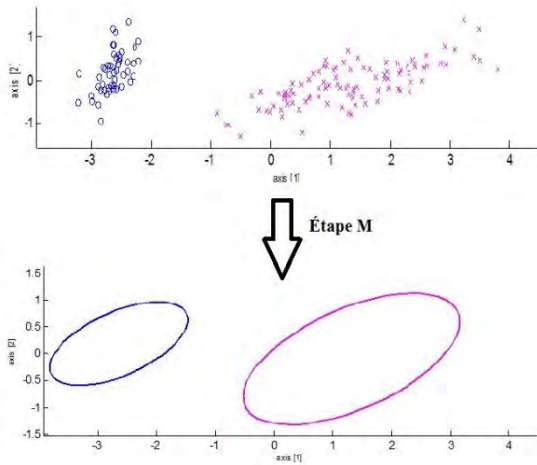


Figure 32 : Etape MAP

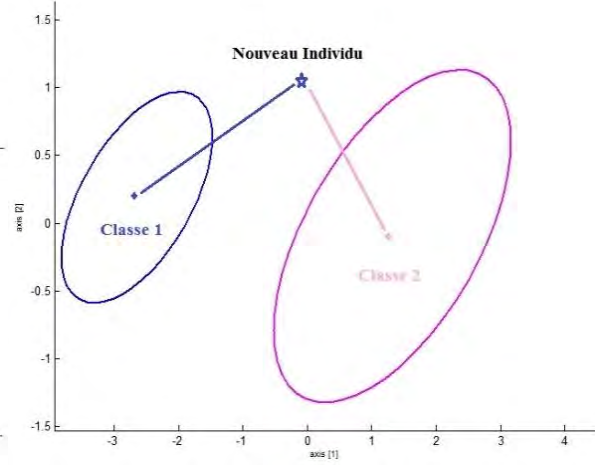


Figure 33 : Etape M

a. Étape M

Elle consiste à estimer les paramètres du modèle de mélange $\hat{\theta}$ par la maximisation du log-vraisemblance sur les données complétées (x, z) .

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} L(\theta; x, z) \quad \text{Équation 20}$$

Avec le log-vraisemblance complété donné par :

$$L(\theta; x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K z_{ik} \log(\pi_k f(x_i, \alpha_k)) \quad \text{Équation 21}$$

Les classes sont résumées et interprétées par $\hat{\theta}$. Sur la Figure 33, après l'étape M, on obtient les paramètres estimés $\hat{\theta}$. Ces paramètres permettent de déduire deux densités gaussiennes des composantes qui modélisent les 2 classes.

b. Étape MAP

Avec les $\hat{\theta}$ estimés, on affecte le nouvel individu x_{n+1} à l'une des K classes par la procédure MAP. La règle de décision consiste à choisir la classe pour laquelle la probabilité t_{ik} est la plus élevée.

$$\hat{z}_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = \underset{h=1,\dots,K}{\operatorname{argmax}} t_{ih}(\hat{\theta}) \\ 0 & \end{cases} \quad \text{Équation 22}$$

Dans le cadre particulier de :

- Matrice de covariance de chaque classe ayant toutes le même déterminant (même forme) ;
- Classes équiprobables (même valeur de π_k) ;
- Fonction coût symétrique ;
- L'étape MAP se résume à chercher la distance de Mahalanobis minimale des distances entre le nouvel individu et le barycentre de chacune des classes [150].

6. Conclusion

Nous avons dans ce Chapitre II, introduit au stade de la conception notre vision d'un système complet pour la surveillance au sein des silos. L'originalité de notre proposition est de proposer un système associant :

- une fonction de prévention du risque d'infestation par le couplage d'un modèle thermique et d'un modèle biologique avec l'ambition d'alerter 20 à 30 jours à l'avance d'un risque potentiel de développement des insectes ;
- une fonction de détection qui doit, sur la base d'un seuil de 1 insecte par kilo doit être en mesure de lancer une alarme de danger et déclencher les actions de traitements prévus ;
- une fonction de commande que nous n'avons pas développé ici mais qui, dans le projet ECOSILO, prévoit, au déclenchement de l'alerte biologique de lancer le traitement : émissions d'attractifs, collecte des insectes et, au signal d'alarme, traitements par doses insecticides maîtrisés.

Notre approche se distingue fondamentalement des approches connues de par l'introduction d'une détection préventive des insectes, ce, grâce à l'intégration d'un modèle biologique appuyé par un modèle thermique de la cellule de stockage. Nous faisons l'hypothèse d'une présence infime de larves ou d'insectes et compte tenu des conditions de température et d'humidité, nous calculons l'évolution sur le long terme de la population ; lorsqu'une prédiction de développement arrive à un niveau dangereux, une alerte est émise à destination des opérateurs qui peuvent prendre toute initiative afin de

tester la présence effective d'insectes. On pourra imaginer, dans un usage systématisé de cette approche, corriger pas à pas, par des techniques d'apprentissage, les paramètres du modèle biologique en fonction des vérifications faites sur la densité d'insectes au moment des alarmes.

L'autre point clef est celui des capteurs en charge de la détection d'infestations. Nous avons analysé trois possibilités :

- la température en proposant une approche originale basées sur la disponibilité du modèle thermique ce qui permet de travailler en « différentiel » entre température prédite et température courante pour détecter, avec la plus grande sensibilité un accroissement « anormal » de la température locale autour du capteur ;
- le CO₂ qui selon nous, est très intéressant car il intègre la surveillance de plusieurs origines de risques : la germination du grain, les développements de moisissures et bien sûr l'infestation par les insectes : bien qu'il ne soit pas de ce point de vue sélectif il peut témoigner objectivement (certifier formellement) de l'état de santé du silo ;
- la sonde acoustique paraît aussi comme une option à intégrer dans une surveillance « complète » : c'est une détection sélective du bruit émis par les larves et les insectes. En détectant les larves, elle apporte une solution possible à une détection factuelle « au plus tôt ».

En résumé, dans cette étape de conception, nous avons retenu les options suivantes :

- une architecture système de type système de surveillance multi sensorielle ;
- pour la prévention des risques, le couplage d'un modèle d'évolution thermique du point de mesure avec un modèle biologique de développement des insectes ;
- Pour la détection, une première préconisation est de mieux exploiter les mesures thermiques dans l'esprit d'exploiter le modèle prédictif précédent. En fait, plusieurs options sont possibles qui se complètent le plus souvent. Nous en retenons deux :
 - ❖ La détection de CO₂ ;
 - ❖ La détection acoustique.

Pour toutes ces propositions, nous allons effectuer au Chapitre III, les évaluations nécessaires et proposer des recommandations pour l'étape de mise en œuvre technologique.

Chapitre III : Les technologies de mise en œuvre

1. Introduction

Nous avons dans le chapitre précédent, à partir d'une analyse des besoins, défini plusieurs options de surveillance et de prévention des risques. Ce chapitre est consacré à la description de nos choix technologiques utilisés dans la mise en œuvre de ces options. Parmi les difficultés rencontrées au sein du projet, nous trouvons l'aspect pluridisciplinaire nécessairement prendre en compte et qui mêlent des technologies mécaniques, électroniques, algorithmiques et biologiques ; nous n'aurions pas pu mener à terme ces travaux sans le concours des équipes techniques du LAAS-CNRS (Service électronique et atelier de mécanique) et de l'entreprise VALCAP qui a réalisé les prototypes SILOTEST 1 et 2.

Pour cette mise en œuvre, nous nous sommes laissés guider par les usages et proposons trois axes de produits :

- SILOTEST 1 est une instrumentation portable de surveillance multi-capteurs destinée à être placée sur le haut du tas de grains défini comme une zone qui se réchauffe rapidement au printemps et qui est donc propice au développement des insectes ; cette proposition peut aussi être utilisable pour une surveillance dans des silos de petites tailles ;
- SILOTEST 2 est une proposition d'un outil visant à la détection rapide de la présence des insectes lors de la mise en silo ;
- SILOTEST 3 propose un système multipoints de surveillance dans toute la hauteur du tas de grains ; par rapport aux sondes thermiques actuellement utilisées, cette proposition inclut des mesures nouvelles : sondes acoustiques et capteur de CO₂ dont nous avons donné tous les avantages attendus, notamment en termes de sensibilité de détections.

Ces réalisations s'intègrent dans une vision globale de la surveillance du stockage des grains en silo SILOCARE caractérisée :

- d'une part, par une démarche de surveillance multi-capteurs pour une détection au plus tôt de la présence effective des insectes ;
- d'autre part, par une démarche originale de prévention des risques d'infestations grâce à l'intégration dans le système SILOCARE, d'un modèle biologique prédictif qui peut alerter les opérateurs d'un risque imminent de présence d'une population d'insectes.

La logique de présentation du chapitre sera d'abord d'exposer chaque dispositif dans son ensemble et de décrire plus en détail ses fonctions essentielles ou qui ont supposé des étapes de conception plus fouillées.

2. Les propositions SILOTEST et leurs axes d'applications

SILOTEST 1 est conçu pour la surveillance de la partie supérieure du tas de grain : comme nous l'avons vu dans la modélisation thermique du Chapitre II, le réchauffement qui s'opère au printemps touche d'abord la partie haute du tas de grains. Il est donc légitime de placer les capteurs dans cette zone où le risque de voir se développer des colonies d'insectes est existant. L'originalité technologique de SILOTEST 1 est de proposer un dispositif complexe, miniaturisé, portable qui intègre plusieurs fonctions de détections (température, humidité, sonde acoustique, sonde optique) et de piégeages. Cette conception qui fut la première à être développée, a pour caractéristique d'intégrer dans un même dispositif « tout l'esprit ECOSILO » : En effet, SILOTEST 1 intègre un piège passif, et de quoi émettre des attractifs de manière à rassembler les insectes près de la sonde et de pouvoir les piéger ou les traiter avec un minimum d'insecticides. Dans la conception actuelle, SILOTEST 1 intègre ce piège à insecte passif (qui peut être rendu actif par ajout de substances attractives) avec comptage optique des insectes piégés : nous verrons qu'il a été conçu pour détecter le premier insecte piégé.

SILOTEST 2 est un outil conçu pour contrôler la non-présence d'insectes lors de la mise en silo. L'idée est de procéder au prélèvement d'une petite quantité de grains pour le placer dans une chambre anéchoïque dans le but de faire des tests acoustiques rapides. Nous souhaiterions que l'outil soit capable de détecter un insecte dans un prélèvement de moins de 5 kilos de grains. Ces choix technologiques de prélèvement et d'utilisation d'une chambre de mesure anéchoïque, sont dictés par le souci de filtrer les bruits environnants lors de la mesure qui met en œuvre le test acoustique que nous avons développé dans le Chapitre II. Opérationnellement, le test doit être très rapide afin de ne pas retarder le rythme de la procédure globale de stockage. Soulignons que le test acoustique peut aussi détecter les larves : c'est d'ailleurs un argument fort de la sonde SYSTELIA proposée dans le cadre ECOSILO. Elle diffère de la proposition SILOTEST 2 en ce qu'elle est conçue pour être utilisée directement sur le chargement du camion, sans prélèvement et sans chambre anéchoïque.

SILOTEST 3 a été conçu pour la surveillance du silo dans toute la hauteur du tas de grain. Deux raisons à ce choix technique :

- a. Les opérateurs, de par leur expérience ont témoigné du fait que les infestations pouvaient se produire hors des zones hautes avec des arguments forts qui sont liés à l'hétérogénéité des arrivages de grains et à l'hétérogénéité des conditions du stockage lui-même (poussières, pression, environnement gazeux...).
- b. Aujourd'hui, tous les silos sont équipés de sondes de température multipoints placés dans la hauteur du tas de grains : le « challenge » est de pouvoir y associer d'autres capteurs de détections d'insectes afin d'intégrer le système complet SILOCARE. Celui porte des sondes de mesure réparties dans toute la hauteur du silo (T, H, CO₂).

Nous verrons dans ce troisième chapitre comment ces choix ont donné lieu à des développements technologiques et à des réalisations expérimentales.

3. Les exigences générales technologiques et industrielles

ECOSILO est un projet applicatif : les exigences de conception et de prototypage ont pour but de proposer des solutions à caractère industrialisable. Ces considérations nous ont conduits à appliquer les règles générales de prototypage suivantes :

- Faire le choix de composants et de technologies existants et qui ont déjà fait leurs preuves sur le marché ;
- Privilégier les composants dont les interfaces sont classiques et standardisées ;
- Prendre en compte les contraintes d'encombrement afin de faciliter l'intégration du système ;
- S'inspirer, notamment dans les composantes mécaniques du système, des choix et des composants déjà utilisés dans les silos et qui savent résister aux énormes charges exercées sur les sondes enfouies ;
- Concevoir et réaliser la mécanique et l'électronique de manière classique ;
- Développer un outil logiciel simple et ergonomique donnant accès aux opérateurs, à toutes les données remontées par le système, aux résultats de traitement de ces données et à la commande des actionneurs.

SILOCARE est une proposition de système de surveillance complet qui a pour mission de **sécuriser la qualité du grain**. SILOCARE peut être décrit comme un ensemble de capteurs répartis dans la cellule de stockage (ces capteurs sont de différentes natures : capteurs de température, d'humidité, de CO₂, etc.) et de capteurs apportant des données sur les facteurs d'influence (exemple : température externe) et en perspective, des données plus économiques pour permettre une gestion compétitive des stocks. Au niveau matériel, l'architecture est prévue pour connecter les données des dispositifs SILOTEST 1, 2, 3, données qui vont servir à nourrir la base de données installée dans un PC en salle d'opération. Autour de cette base de données sont développés des algorithmes de traitements et de contrôle en cas de risque d'infestations. L'interface opérateur est accessible sur le PC et peut être lue sur Internet. Les fonctions de surveillance sont :

- Donner sur demande un état du silo au travers d'un tableau de bord des données actualisées,
- Proposer grâce au modèle biologique une estimation du risque par le calcul d'un délai de sécurité (écart entre la date courante et la date hypothétique où la densité d'insectes calculée atteindrait 1 insecte par 5 kilos de grains),
- Donner une alerte automatique lorsque le niveau de risque est jugé dangereux : En pratique, nous proposons d'utiliser sur l'écran d'interface, un signal optique : Rouge, Orange, Vert, laissant aux opérateurs le soin de décider des opérations à mettre en œuvre.

SILOCARE dans ECOSILO a aussi prévu :

- Une interconnexion possible avec la sonde SYSTELIA pour la récupération de ses données au niveau du PC qui peuvent ainsi être associées aux données SILOTEST,
- Des fonctions automatiques qui en cas de risque d'infestations détectées, commanderaient une procédure de traitement : éjection des attractifs, diffusion des insecticides.

Les paragraphes suivants décrivent les composantes de ce système, une par une. Leurs performances opérationnelles seront validées par les expérimentations présentées dans le quatrième chapitre.

4. Le dispositif de contrôle à l'entrée du Silo : SILOTEST 2

Le contrôle de qualité à l'entrée du silo est une opération incontournable afin de définir à la fois la rémunération de l'agriculteur et les conditions du stockage. Le projet ECOSILO prévoyait d'intégrer la sonde SYSTELIA qui affiche deux vocations : mesurer le risque d'infestation à l'entrée du grain et détecter l'infestation en haut du tas de grain. A l'entrée du grain, SYSTELIA propose de planter la sonde en plusieurs points du tas de grains porté par le camion transporteur grâce à un robot manipulateur et de faire la mesure en ligne. Conceptuellement, cela pose deux problèmes de mesure : celui de l'exposition trop conséquente aux bruits environnants qui peuvent être très importants (bruits de moteurs, bruits de circulation, etc.), et celui du délai total de mesure qui retarde nécessairement le déchargement du camion. SILOTEST 2 reprend la proposition de principe mais suggère d'opérer par prélèvements robotisés lors du passage du camion et de porter ces prélèvements dans une chambre sourde de mesure, afin de se placer dans de bonnes conditions sonores. L'idée est aussi de pouvoir exploiter d'autres types de détecteurs d'infestations et donc de parfaire le diagnostic d'entrée du grain.

Dans la pratique courante, le diagnostic d'entrée s'opère de manière codifiée. On prélève une petite quantité de grains que l'on caractérise en grosseur, en niveau de propreté, en niveau de détériorations. La détection de la présence d'insectes se fait aujourd'hui par un procédé de tamisage et de diagnostic visuel. A l'arrivée des cargaisons, des tests sur la qualité et l'état de conservation du produit sont effectués. Pratiquement, tous les grands silos sont équipés d'un préleveur automatique d'échantillons afin de réaliser ces tests ; ils sont ensuite conservés sous forme d'échantillons, probablement afin de répondre à des besoins de contre-expertises.

On observe que la proposition SILOTEST 2 ne perturbe pas le processus habituel. L'intérêt de cet outil sera de faciliter la tâche du test aux agents des silos par une estimation rapide du taux d'infestation du grain et d'intégrer automatiquement ces données d'entrée parmi les données générales de conduite SILOCARE. En plus de la détection de l'infestation par des insectes adultes, la détection acoustique rend possible la détection de l'infestation cachée par les larves, chose qui ne se fait pas actuellement.

SILOTEST 2 est un système qui se présente sous la forme d'un caisson insonorisé ou anéchoïque pouvant contenir jusqu'à 10 Kg de grains. Ce caisson intègre un récipient amovible en inox qui sert de conteneur de grain : il peut être enlevé, nettoyé et remis simplement dans le caisson. La fabrication de ce module a été sous-traitée à la société VALCAP. Les parois du caisson SILOTEST 2 sont fabriquées moyennant des plaques en bois multiplis afin d'assurer la légèreté du caisson. Le récipient de blé est inoxydable. L'isolation phonique est primordiale pour cet outil. C'est pour cette raison que nous l'avons réalisée à l'aide de mousse isolante (Flexolan Acoustics AV40G). Figure 34 illustre le système SILOTEST 2 dans son ensemble.

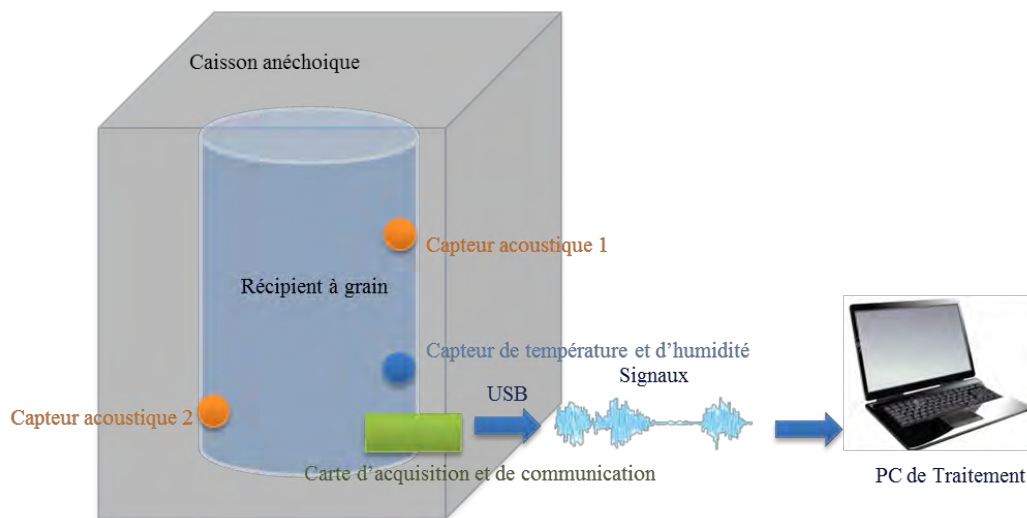


Figure 34 : Schéma fonctionnel de SILOTEST 2

Ce système comporte une électronique embarquée qui effectue en continu les mesures suivantes : température, humidité, bruits acoustiques. Pour la mesure du bruit, nous avons positionné deux capteurs piézo-électriques sur la paroi (voir Figure 34) avec une carte d'amplification et de communication dans le fond du récipient. Il abrite également un capteur de température et d'humidité. La communication avec le PC de contrôle-commande est assurée par une interface USB. Les fonctions sont portées par une carte électronique intégrant un amplificateur opérationnel faible bruit (Ti 2227) et un microcontrôleur PIC. Pour la mesure du bruit acoustique, le capteur piézo-électrique (MULTICOMP ABT-441-RC) a été sélectionné et un capteur Sensorion SHT21 a été intégré pour la mesure de la température. Le développement du programme embarqué assurant la prise des mesures et la communication avec le PC de contrôle est réalisé en langage C et en assembleur sous l'environnement de développement MPLAB® X IDE. Les détails de la réalisation de la carte électronique sont présentés en Annexe B

Suivant les exigences dictées par notre conception, un prototype SILOTEST 2 a été réalisé. La Figure 35 présente le système proposé final pour la détection rapide à l'entrée des silos



Figure 35 : SILOTEST 2

5. Le dispositif de surveillance en surface du tas de grains SILOTEST 1

Le projet ECOSILO prévoyait initialement de ne contrôler le développement d'insectes qu'en surface, en haut du silo. Le projet argumentait que le réchauffement s'opérait à partir de la température ambiante extérieure et que donc, ce sont les parties les plus directement en contact qui se réchauffent le plus vite et font courir le risque du développement des insectes présents et des larves cachées. La sonde SYSTELIA est prévue pour remplir la fonction de détection : elle est conçue pour être directement plantée dans le tas de grains ; elle permet via SILOCARE de lancer une alarme et de commander un traitement insecticide.

Avec SILOTEST 1, nous nous sommes posés la question de concevoir une sonde multifonctionnelle capable de mettre en œuvre la démarche complète proposée par ECOSILO, pour réduire l'usage d'insecticides à une fraction du silo fragile dans lequel les insectes seraient concentrés à l'aide d'attractifs. La proposition SILOTEST 1 est d'intégrer dans un même dispositif les trois fonctions : attraction des insectes, détection et commande insecticide.

Il s'agit d'une sonde multifonctionnelle telle que représentée par le schéma de la Figure 36 Cette solution devra rassembler dans une même sonde, toutes les fonctions capteurs susceptibles d'être présentes dans un dispositif final. Cela a conduit à la conception du dispositif de la Figure 42 dont les caractéristiques essentielles sont d'associer les fonctions capteurs (température, humidité), les fonctions de détection d'insectes (détection acoustique, détection optique), une fonction piégeage : diffusion d'attractifs, relargage d'insecticides. Le dispositif devrait être placé dans le tas de grains où il aura pour mission de collecter les mesures, attirer les insectes, détecter les insectes et les traiter par insecticides.

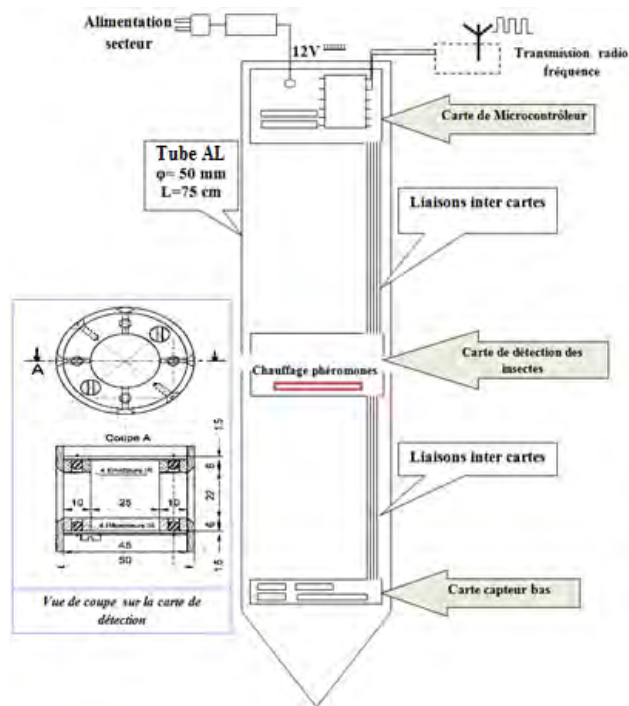


Figure 36 : Le schéma structurel de la sonde multi-sensorielle SILOTEST 1

La surveillance de l'infestation dans les silos en site réel, suppose de positionner des capteurs dans le tas de grains : c'est un objectif que l'on sait possible et utile si l'on vise une surveillance de la partie haute du tas de grains.

Technologiquement, SILOTEST 1 se présente comme un piège-sonde formé d'un tube aluminium de 90 cm de longueur et 5 cm de diamètre, avec une extrémité pointue facilitant son insertion dans le tas de grains. La partie supérieure de la sonde contient :

- une carte microcontrôleur maîtresse qui gère les différents capteurs de la sonde, elle communique avec le PC de contrôle via une interface RS232 ;
- un capteur qui mesure la température et l'humidité ambiante. Ce capteur est situé en haut de la sonde et est sensé prendre les mesures de l'air ambiant ;
- un capteur acoustique de type microphone.

Le centre de la sonde est la partie piège qui intègre :

- un piège tube en plastique disponible dans le commerce ;
- une petite chambre pouvant accueillir une capsule à attractifs volatils (alimentaire, sexuel) ;
- une résistance commandée qui sert à chauffer la capsule à phéromones afin de contrôler le relargage de l'attractif ; à noter que la sonde est conçue de telle sorte que les attractifs sortent uniquement par l'entrée du piège-tube pour y attirer les insectes migrants vers ce piège ;
- un ventilateur installé en bas de cette partie médium, récupérant l'air par un tuyau du haut de la sonde afin de le pousser vers l'entrée du piège-tube. Le ventilateur crée une certaine

pression dans la chambre à phéromone, ce qui aboutit à une meilleure diffusion de l'attractif autour de la sonde ;

- une barrière infra-rouge qui détecte le piégeage des insectes et permet donc de compter le nombre d'insectes tombés dans le piège.

La partie inférieure de la sonde comprend :

- un capteur acoustique (piézoélectrique) collé autour de cette partie afin de détecter l'éventuelle présence d'insectes par le bruit qu'ils produisent ;
- un amplificateur de charge, pour amplifier les faibles signaux prélevés par le capteur acoustique ;
- un capteur de température et d'humidité qui sert à prélever les mesures en rapport avec la température et l'humidité de l'air inter-granulaire.

SILOTEST 1 est donc un instrument multi-capteurs, à fonctionnement autonome que l'on peut « planter » dans le haut du tas de grains à profondeur de l'ordre du mètre. L'originalité attendue de SILOTEST 1 est d'intégrer un piège passif et/ou actif à insectes et un détecteur optique afin de détecter le premier insecte piégé mais aussi pour compter leur nombre. La Figure 37 montre le modèle 3D de la sonde SILOTEST 1.

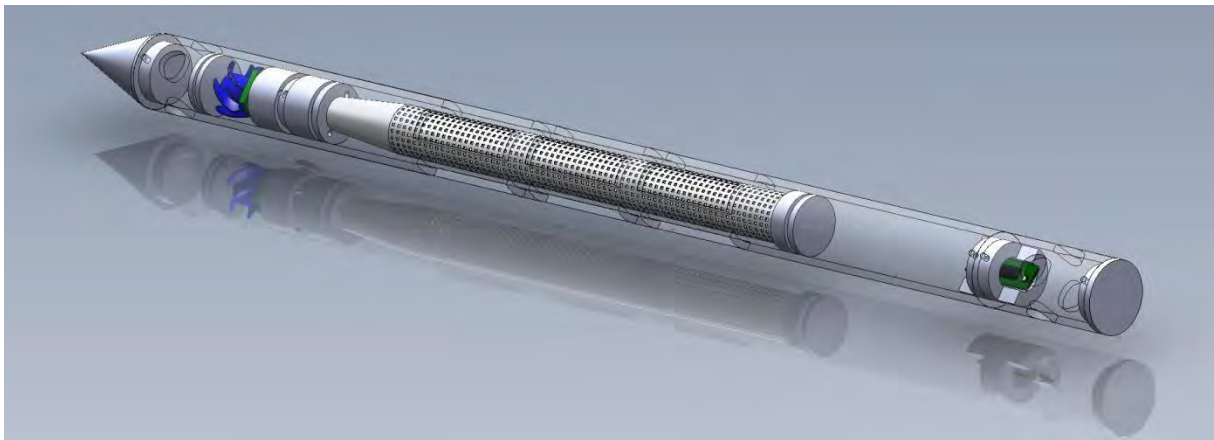


Figure 37 : Schéma 3D de la sonde SILOTEST 1

Le piège compteur d'insectes est représenté dans la Figure 38 :

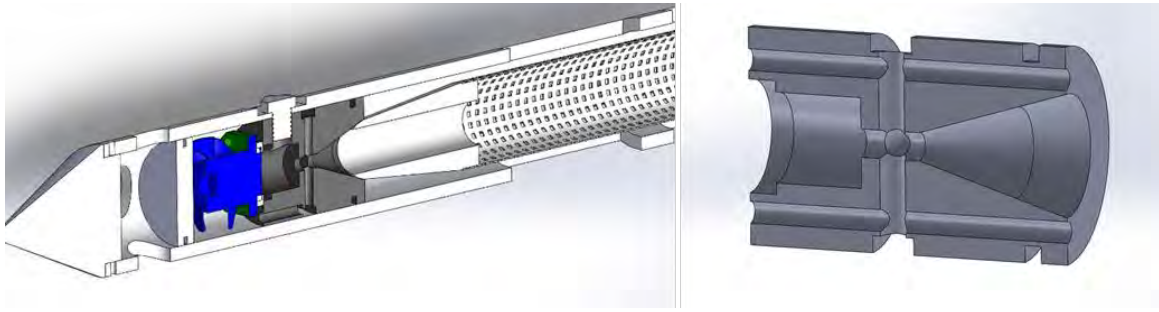


Figure 38 : Modèle du piège à insectes

La sonde SILOTEST 1 est une sonde autonome, elle s'interface avec le PC de contrôle par une liaison série. La lecture des données capteurs est programmée de façon à ce qu'elle se fasse automatiquement, suivant les paramètres de l'étape d'initialisation. Un timer est lancé et pour chaque cycle d'une durée t (initialement programmée), la sonde enregistre dans une mémoire interne toutes les valeurs capteurs. La sonde SILOTEST 1 gère aussi les commandes émises par le PC de contrôle. Les commandes sont nécessaires pour lancer un enregistrement acoustique, activer ou désactiver la ventilation ou le chauffage de l'attractif / insecticide. Le traitement des enregistrements acoustiques est effectué au niveau du PC de commande.

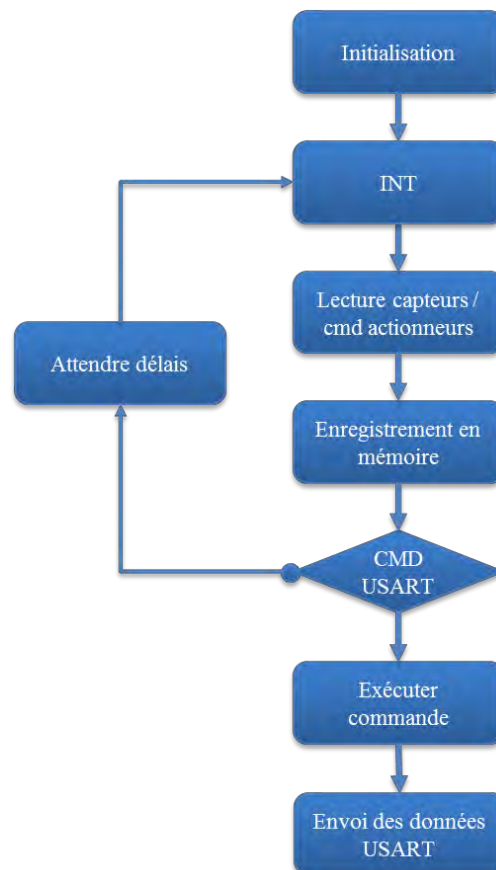


Figure 39 : Organigramme du principal programme embarqué

Dans le cas où la barrière optique du piège est coupée par la chute d'un insecte, une interruption sera déclenchée, le compteur incrémenté et enregistré dans la mémoire interne puis une alarme sera envoyée via la liaison série au PC de contrôle.

L'algorithme présenté dans la Figure 39 récapitule la logique du programme principal qui sera embarqué dans la sonde SILOTEST 1.

Dans le but d'assurer l'intégration de l'intelligence du système, et de la communication avec le PC de contrôle, nous avons décomposé l'électronique de la sonde SILOTEST 1 en plusieurs parties comme présenté dans la Figure 40.

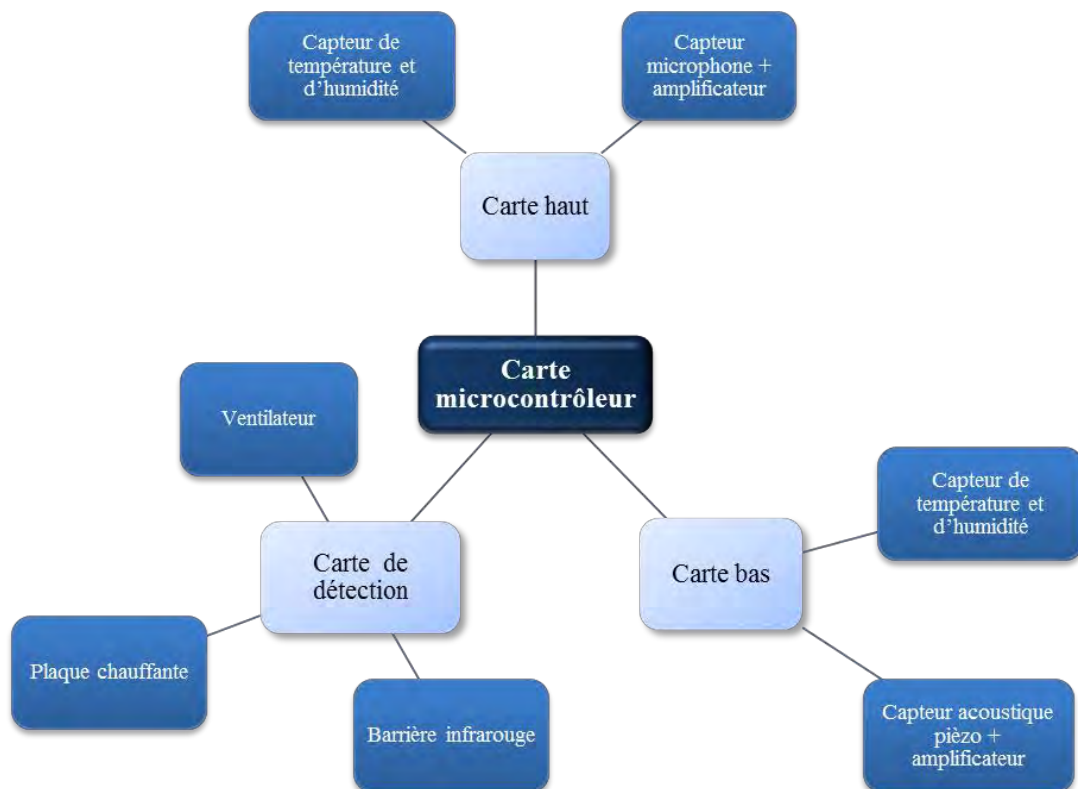


Figure 40 : Architecture électronique de la sonde SILOTEST 1

Cette décomposition facilite l'intégration de l'ensemble des capteurs embarqués dans la sonde, et rend également la maintenance plus simple. La carte microcontrôleur assure la communication avec les différentes autres cartes, ainsi que la gestion des interruptions et de la communication avec le PC de contrôle. La carte microcontrôleur est présentée dans la Figure 41.

La programmation de cette carte a été réalisée en langage C sous l'environnement de développement MPLAB X.



Figure 41 : La carte microcontrôleur

La production du prototype SILOTEST 1 suivant la conception présentée ci-dessus a conduit au dispositif de la Figure 42. La structure est fabriquée en aluminium et intègre un piège tube en plastique.



Figure 42 : Le prototype final SILOTEST 1

SILOTEST 1 démontre parfaitement la faisabilité d’une mise en œuvre du concept complet ECOSILO. Il peut efficacement être utilisé pour la surveillance des cellules de petites tailles, comme celles que nous pouvons trouver dans les fermes. Les volumes de grains sont en général limités et les ensilages homogènes. Il ne fait pas de doute que les zones privilégiées d’infestation sont plus facilement prévisibles et contrôlables par SILOTEST 1.

La question de la surveillance des gros silos s’est toutefois rapidement posée compte tenu des enjeux considérables : peut-on à partir d’une sonde placée dans le haut du tas de grains, garantir la pleine sécurité des grains ?

Après les discussions que nous avons eues avec les hommes de terrain concernant les grandes cellules et surtout celles utilisées pour le stockage à long terme, nous avons conclu que la surveillance doit couvrir toute la cellule pour les raisons suivantes :

- Les grands silos reçoivent des récoltes de toutes origines, avec des qualités de grains différentes et donc des niveaux de pré-infestations différents ;
- Les grands silos sont gérés par des exigences commerciales et peuvent être partiellement vidés et remplis à nouveaux ;
- Il arrive que les nettoyages-stérilisations des parois ne soient pas parfaits et que des lots de potentielles infestations restent présents entre deux ensilages ;
- Les mécanismes de croissance des colonies d’insectes sont encore mal connus : par exemple, la zone centrale des silos où la poussière est très importante peut rencontrer des comportements imprévisibles ;

- La circulation de l'air de refroidissement est incontrôlée et peut laisser des zones propices aux développements des insectes.

En résumé, ont été observées des infestations qui pour l'instant ne sont pas vraiment comprises mais qui invitent à une surveillance répartie dans le silo autant en positionnement que sur la hauteur du tas de grains. Pour cet effet, nous avons repensé notre système afin qu'il soit adapté pour ce type de stockage et permette une surveillance la plus complète possible.

6. La surveillance de toute la cellule de stockage : SILOTEST 3

C'est une première proposition afin d'arriver à une surveillance plus complète. A la différence de SILOTEST 1, SILOTEST 3 est conçu pour la surveillance de toute la colonne centrale de la cellule de stockage comme le montre le schéma de la Figure 43 : les sondes sont disposées dans la hauteur du tas de grains et réparties régulièrement dans toute sa surface. Cette proposition s'inspire des pratiques actuelles concernant le positionnement des sondes thermiques.

Ce choix technologique est lourd de conséquences, dans le sens où ces sondes sont soumises à des forces de traction énormes, en fonction directe de la hauteur du tas de grain et de la surface latérale de la sonde. En l'état des technologies, les câbles supportant les capteurs sont des canalisations plastiques (diamètre intérieur de 2 cm environ), renforcées par un enroulement très dense de câbles mécaniques.

Une deuxième proposition est d'embarquer plusieurs types de capteurs répartis : T, H, CO₂, sonde acoustique, qui en l'état des technologies ne peuvent pas s'envisager miniaturisées au point d'être intégrées dans les canalisations des sondes actuelles : nous avons dû envisager de sectionner le câble porteur et d'insérer des modules multi capteurs. Évidemment, il a fallu résoudre la continuité mécanique ce qui a été réalisé par notre atelier de mécanique et qui sera décrit plus loin.

SILOTEST 3 se présente donc sous forme d'une sonde multi-modulaire dont chaque module (Figure 43) embarque plusieurs capteurs : Les capteurs et les électroniques de proximité sont conçus pour être placés dans des modules cylindriques de 9 cm de diamètre et de 15 cm de haut, répartis sur la hauteur d'une sonde classique de température adaptée à cet effet. Chaque module embarque différents capteurs dont le capteur du CO₂.



Figure 43 : Sonde SILOTEST 3 implémentée dans un silo

Le schéma fonctionnel du module multi capteurs est présenté dans la Figure 44

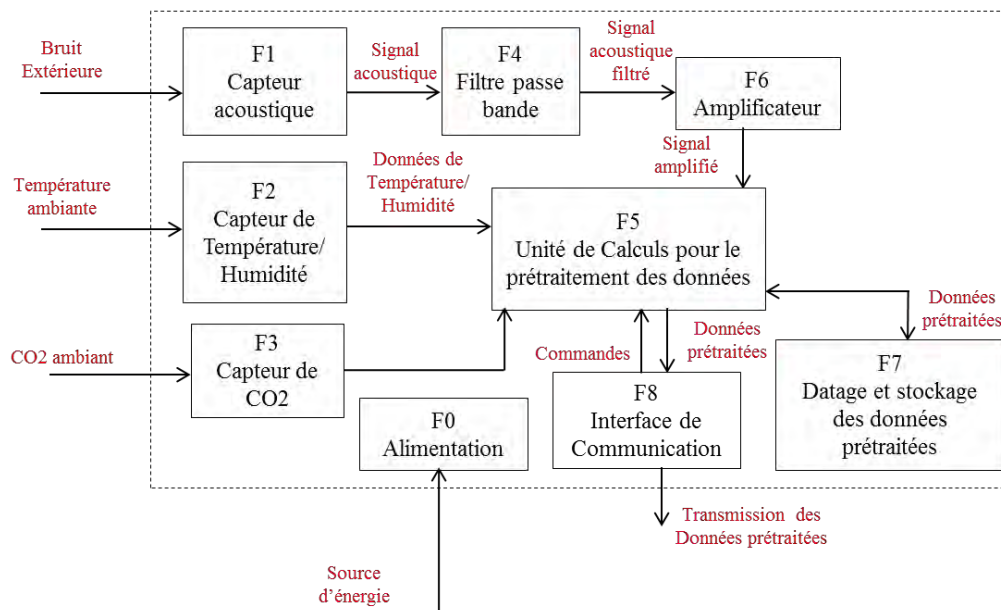


Figure 44 : Schéma fonctionnel des modules SILOTEST 3

Le prototype de la sonde SILOTEST 3 que nous avons conçu a été réalisé au LAAS-CNRS. Il comporte trois modules multi-capteurs. La communication directe avec plusieurs modules peut être une tâche compliquée, c'est pour cette raison que chaque sonde dispose d'un module supplémentaire : une carte électronique qui fait l'interface entre l'ensemble des modules portés par la sonde et le PC de contrôle. Cette carte reçoit les commandes envoyées par le PC de contrôle, puis interroge et relaie les

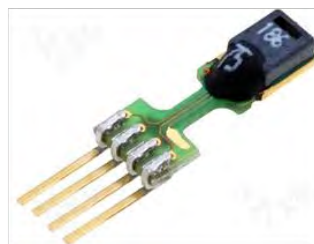
données de mesures capteurs au PC de contrôle où elles seront finalement enregistrées. La communication entre cette carte et le PC est réalisée par le protocole TCP-IP. Cela permet de contrôler un grand nombre de sondes aisément. Les échanges entre les modules multi-capteurs et la carte relais se fait par le protocole RS232.

Nous présenterons dans ce qui suit, l'ensemble des capteurs embarqués dans les modules multi-capteurs (Figure 45) :

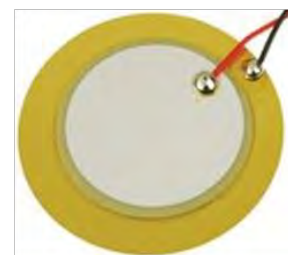
- Une carte microcontrôleur qui communique avec les différents capteurs et qui assure également la communication avec l'extérieur :
 - μC : PIC 18F.
 - Communication : RS232.
- Un capteur de CO₂ :
 - Modèle : COZIR GC-0013
 - Dimension : Ø 50,6 mm, H 16,8 mm
 - Rang : 0 - 2000 ppm,
 - Précision : ± 30 ppm.
- Un capteur acoustique piézo-électrique :
 - Modèle : MULTICOMP MCABT-455-RC
 - Fréquence de résonance : 2,8 kHz
 - Dimension : Ø 35mm, H 0,51mm.
- Un capteur de température et d'humidité :
 - Modèle : Sensirion's SHT75
 - Dimension : 3,7 x 19,5 x 3,1 mm
 - Précision température : $\pm 0,3^{\circ}C$
 - Précision Humidité : $\pm 1,8\%$ RH



capteur de CO₂



capteur de
température et d'humidité



capteur acoustique

Figure 45 : Capteurs utilisés

Le choix du capteur du taux de CO₂ s'est imposé du fait de l'absence d'alternative sur le marché français. En effet, d'autres capteurs de dimensions plus petites peuvent être trouvés en vente en Chine

ou aux USA, mais malheureusement il ne nous a pas été possible de les commander. Ceci a conduit à la conception un module multi-capteurs cylindrique plus grand afin d’abriter tout le circuit.



Figure 46 : Montage du module multi capteurs SILOTEST 3

Les différents schémas circuits électriques et leur câblage seront présentés dans l’Annexe B. Après cette étape de conception et de choix technologiques, nous avons fabriqué les modules SILOTEST 3 avec l’appui du service électronique et l’atelier de mécanique du LAAS-CNRS. Les modules cylindriques sont fabriqués en matériau inoxydable afin qu’ils résistent aux conditions de stockage de grains. Les cartes électroniques développées sont intégrées dans les cylindres comme le montre la Figure 46:

L’étape suivante consiste au montage et sertissage du module SILOTEST 3 au câble porteur. Pour ce faire, nous avons récupéré une ancienne sonde thermométrique qui se présente sous la forme d’un tuyau en plastique armé composé de brins en acier torsadés. Les capteurs thermométriques sont logés à l’intérieur du tuyau. Pour la réalisation de la sonde SILOTEST 3, nous avons voulu garder le même principe. Nous avons donc découpé le câble en plusieurs morceaux, en fonction de la hauteur. Dans notre cas, il s’agit de morceaux de 3 m. Les extrémités sont par la suite dénudées, les brins écartés et enfin sertis à l’aide d’un disque contre le cylindre en inox. La Figure 47 décrit l’attachement des cylindres au câble.



Figure 47 : Montage de la sonde et sertissage sur le câble

Cette première version SILOTEST 3 a pu être utilisée sans aucun problème dans des cellules de tailles moyennes (<700 tonnes). En revanche, il sera probablement nécessaire de revoir la conception de nos modules pour les miniaturiser davantage afin de les rendre compatible avec les contraintes de pressions et de cisaillements très importantes dans les cellules de grande capacité s'exerçant dans le tas de grains, notamment lorsque celui-ci est en mouvement : au remplissage et surtout à la vidange.

7. Le logiciel SILOSOFT pour la conduite du système SILOCARE

Nous venons de voir comment nous avons conçu et réalisé les prototypes matériels : il s'agit de dispositifs multi-capteurs répartis dans le silo avec une mission de mesure et de surveillance. Ce sont :

- Les capteurs de température, d'humidité ambiante et de connexion à la météorologie nationale,
- La sonde SILOTEST 1 et la sonde commerciale SYSTELIA placées sur le haut du tas de grains,
- La sonde SILOTEST 2 placée à l'entrée du silo et qui contrôle la qualité du grain au début de l'ensilage,
- La sonde SILOTEST 3 placée dans toute la hauteur du tas de grain.
- Ces données de surveillance sont couplées aux données du modèle biologique de croissance pour tenter d'anticiper les risques d'infestation. Elles sont collectées et mémorisées dans une base de données gérée par le PC.

Le logiciel SILOSOFT est là pour, à partir des données recueillies dans la base de données, gérer, contrôler et commander. Cela peut être et sera certainement en exploitation réelle, un ensemble important de modules logiciels allant des aides à la décision opérationnelle, aux aides aux décisions de natures commerciales et socio-économiques. Nous ne traitons dans ce travail que de la possibilité **d'initialiser et de réinstaller les sondes SILOTEST, de consulter les données capteurs en temps réel, de suivre l'évolution des différents paramètres de santé du grain et d'envoyer des alertes si la situation le nécessite.** Une interface simplifiée et ergonomique, validée par les opérateurs a été développée afin de rendre l'utilisation du système plus accessible.

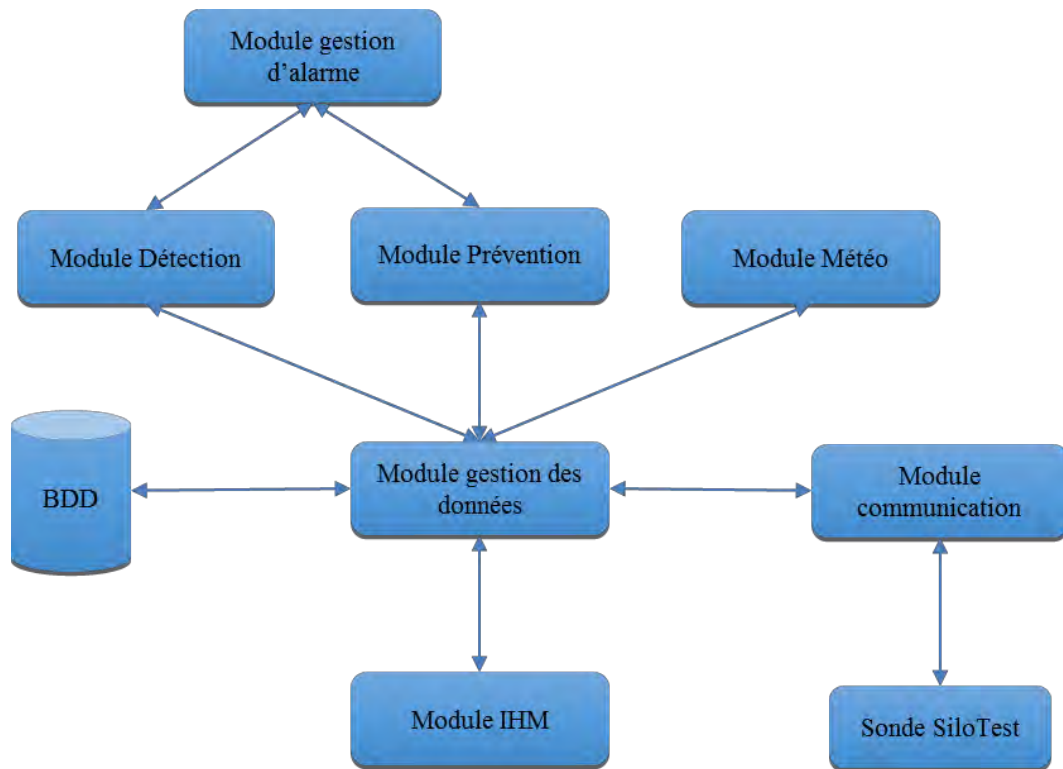


Figure 48 : Architecture modulaire du logiciel SILOSOFT

Nous présentons dans ce paragraphe, notre démarche de conception du logiciel SILOSOFT. L'idée directrice est d'offrir un outil informatique dans le but de faciliter l'accès aux différentes données sur le grain stocké et de simplifier l'utilisation des multiples fonctionnalités du système SILOCARE. De la même manière que pour le système SILOCARE, le logiciel SILOSOFT doit être conçu de façon modulaire afin de faciliter le développement et la maintenance de cet outil d'un point de vue pratique.

Dans une vision plus avancée ou même commerciale, cela permettra d'étendre les fonctions ou les options suivant les besoins de l'utilisateur final. La Figure 48 représente les différents modules constituant le logiciel SILOSOFT.

Précisément, SILOSOFT devra assurer les fonctionnalités suivantes :

- la communication avec les différentes sondes ;
- l'acquisition des données capteurs, ainsi que les données prévisionnelles de la météo ;
- le stockage et l'archivage des données capteurs ;
- l'affichage de manière simple et ergonomique de toutes les informations issues des différents capteurs ;
- le traitement des données capteurs, c'est-à-dire l'intégration du modèle thermique, du modèle biologique mais aussi le traitement des signaux acoustiques ;
- La configuration des variables des modèles et alarmes ;
- l'envoi des alarmes.



7.1. Les couches logicielles

Plusieurs techniques ont été développées afin de mieux structurer le code logiciel. Une des architectures les plus communément utilisées, notamment celles proposant une interface graphique, est la méthode MVC qui signifie Model - View – Controller [151]. Le principe de MVC repose sur la dissociation du logiciel en différentes couches communicantes entre elles par divers mécanismes (appel de méthodes, génération d'événements...). Cela permet la division du problème en sous-parties spécialisées (Figure 49).

- **Vue** : Le rôle de cette couche est de fournir une interface à l'utilisateur pour qu'il puisse manipuler le logiciel. Elle va interagir avec la couche contrôle et va transmettre les données saisies en fonction des événements déclenchés par l'utilisateur. Elle peut également interagir directement avec la couche modèle pour la consultation des données. La couche interface (vue) ne gère que les aspects graphiques de l'application C'est le niveau le plus haut dans l'architecture du logiciel et c'est la seule couche qui va interagir avec l'utilisateur.
- **Contrôle** : Le rôle de cette couche est de piloter les cas d'utilisation du logiciel. Chaque élément de la couche contrôle (contrôleur) est responsable d'un cas d'utilisation, et c'est elle qui gère son fonctionnement. La couche contrôle agit sur deux niveaux de l'architecture :
 - la couche interface afin de gérer l'interface Homme-Machine ;
 - la couche modèle afin d'effectuer les traitements sur les objets Métier de l'application, c'est-à-dire au niveau interne.
- **Modèle** : Le rôle de cette couche est de gérer les composants élémentaires de l'application, donc les objets Métier (entités). Chaque composant de cette couche sera responsable d'un élément interne de l'application et possédera ses propres attributs et méthodes.

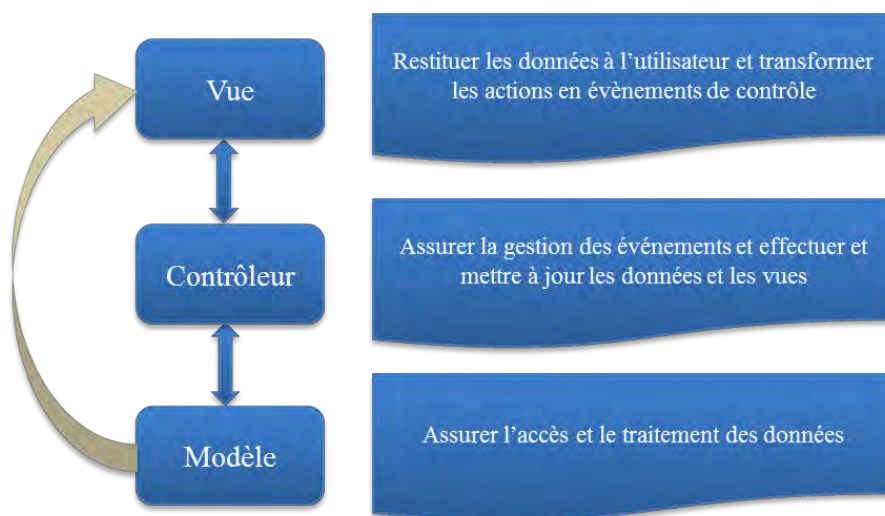


Figure 49 : La communication entre les différentes couches logicielles

En appliquant les règles de conception précédentes, nous avons développé une première version du logiciel SILOSOFT, comme l'illustre la Figure 50. L'interface a été conçue de manière à simplifier au maximum l'accès à l'information. Pour cette première version, le langage Java nous a paru le mieux adapté à la réalisation. Avec son nouvel outil JavaFx qui offre une apparence moderne avec du contenu riche, une application JavaFx peut être exécutée comme un logiciel de bureau de même comme une applet en utilisant un navigateur web. Le choix du langage de programmation Java fut motivé par sa principale particularité : le langage multiplateforme. Une application Java peut être exécutée sous un système Windows, MacOS ou Linux car le Bytecode (le code intermédiaire) généré par le compilateur est interprété par la machine virtuelle Java installée sur le système d'exploitation. L'application ne dépend donc que de la machine virtuelle (JVM) et non du système d'exploitation. Aussi, Java est une technologie gratuite et est intégrée dans plusieurs environnements de développement, notamment NetBeans qui a été utilisé pour faire le développement.

Pour le stockage des données, une base de données MySQL a été développée et interfacée avec le logiciel SILOSOFT. MySQL est l'un des systèmes de gestion de base de données les plus utilisés qui propose des fonctionnalités évoluées et puissantes. Comme Java, MySQL est un système libre d'utilisation et donc gratuit.

Pour cette première version, l'ensemble des outils développés est installé dans le PC de contrôle, mais une séparation physique des différentes couches devra être envisageable pour une réelle utilisation. Cela exige donc soit une intégration des logiciels dans le système d'information déjà présent, soit une installation à part, dédiée au système SILOCARE.

7.2. L'interfaçage utilisateur

Ce logiciel propose un tableau de bord simple avec des indicateurs interprétables par la couleur affichée : le vert pour une situation normale, orange pour un risque d'infestation dans le mois à venir et rouge pour un risque probable dans la semaine ou les deux semaines à venir. Cette configuration proposée peut être modifiée et programmée suivant les besoins de l'utilisateur.

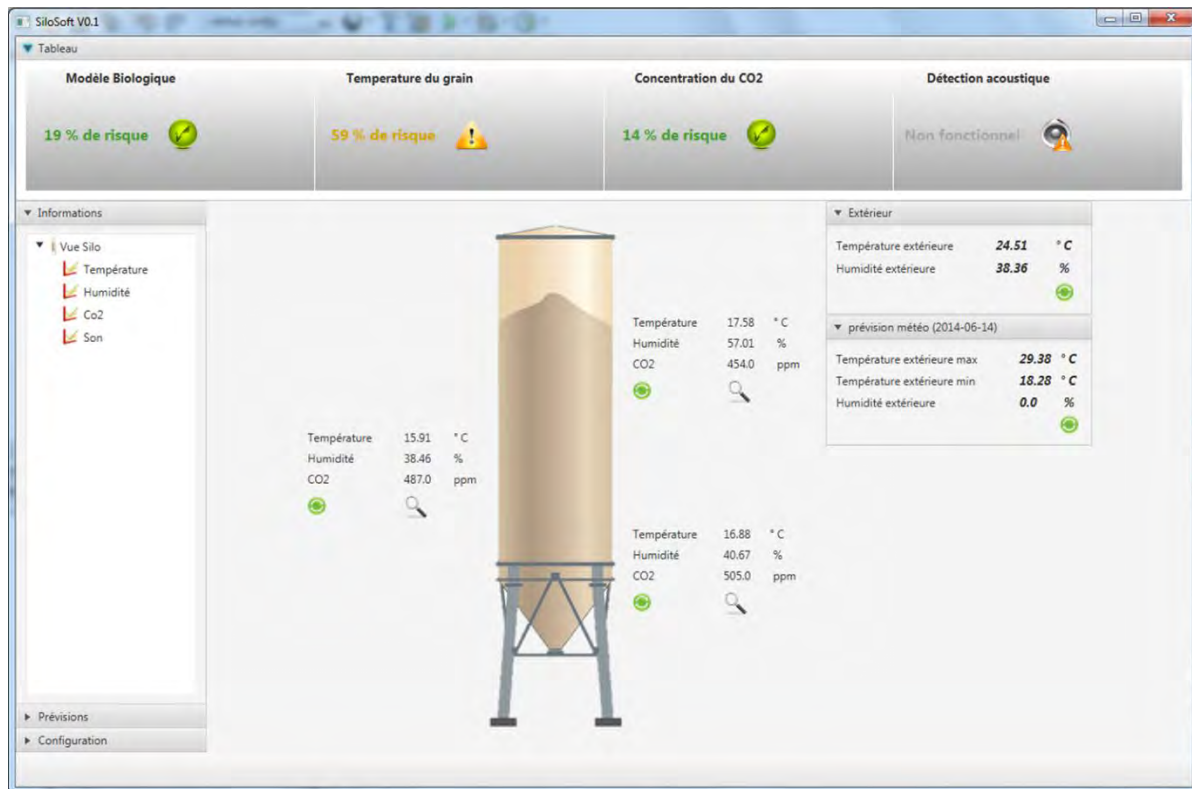


Figure 50 : IHM principale du logiciel SILOSOFT

8. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons exposé notre démarche, partant des éléments de conception du Chapitre II, pour la mise en œuvre matérielle et logicielle. Plusieurs produits potentiels issus de nos travaux sont présentés (SILOTEST 1, 2, 3) et leurs fonctions de surveillance dans les silos précisées. Les technologies électroniques sont introduites et détaillées en annexes.

Le module dédié à la détection d'infestation à l'entrée du silo SILOTEST 2 est un outil essentiel pour faciliter l'établissement du bilan de santé du grain avant l'ensilage, cet outil pourra jouer un rôle important dans la définition de la valeur réelle du grain à entreposer et pourra également aider à la gestion de son stockage et la nécessité du traitement ou non lors de l'arrivée.

SILOTEST 1 est une sonde multi-capteurs intégrant un piège passif/actif avec une détection et comptage du nombre d'insectes piégés. La sonde SILOTEST 1 peut être facilement déployée dans une cellule de stockage, il suffit de la planter en haut du tas de grains afin qu'elle surveille cette partie considérée comme des plus vulnérables dans le silo. SILOTEST 1 est un instrument miniaturisé, portable qui illustre parfaitement le concept ECOSILO de coupler la détection, la gestion des attractifs et la commande d'un traitement optimisé pour réduire l'usage des insecticides. C'est une proposition que nous recommandons pour un usage systématique dans les petits silos : elle serait bien adaptée pour la surveillance des petits stocks pouvant être trouvés dans les fermes des agriculteurs.

La sonde SILOTEST 3 vise une surveillance complète du stockage dans toute sa hauteur et dans toute sa largeur. La volonté de répartir des modules multi-capteurs (T, H, CO₂, Sondes acoustiques) nous a obligés technologiquement à modifier les supports mécaniques.

SILOCARE est notre proposition « système » qui a vocation d'usage dans les grandes installations. Elle intègre dans son architecture système les prototypes SILOTEST 1, 2, 3 et le module de prédiction des risques basé sur une modélisation biologique de la croissance des insectes. Finalement, nous avons présenté les caractéristiques de notre logiciel SILOSOF, logiciel de surveillance, de commande et de contrôle. Le logiciel SILOSOF développé apporte des réponses aux exigences de gestion de tout le système de surveillance et d'aide à la décision. SILOSOF est un logiciel multi-plateformes qui peut être déployé facilement dans un système Windows, MacOS ou Linux. La base de données du logiciel SILOSOF contient toutes les données capteurs ainsi que tous les résultats des traitements de ces données, ceci représente un bon support pour le suivi et la traçabilité liés à la santé du grain. Son interface graphique développée à l'aide de la nouvelle technologie JavaFx propose une présentation ergonomique et moderne.

Ces différents développements et prototypages permettent de répondre à notre problématique initiale : Comment pouvons-nous surveiller efficacement les grains stockés dans les silos ? Nous pouvons dire à la suite de ce chapitre que la faisabilité technologique est acquise dans le prolongement de nos conclusions du deuxième chapitre sur la conception.

Les différentes technologies logicielles et matérielles proposées constituent une réelle plateforme de test pour évaluer la performance d'un tel système de surveillance qui sera présenté dans le Chapitre IV.

Chapitre IV : Évaluation et validation des solutions ECOSILO

1. Introduction

Le Chapitre I et le Chapitre II ont présenté les objectifs de nos travaux et décrit les démarches de conception et de fabrication de plusieurs modules SILOTEST et d'un système complet de surveillance des grains entreposés nommé SILOCARE.

L'ensemble des outils présentés a pour ambition de proposer des solutions nouvelles pour surveiller en continu l'état de santé du grain depuis son arrivée à l'entrepôt de stockage jusqu'au moment de sa sortie (ou vente). Cette idée répond à un besoin réel de maîtrise des infestations du grain stocké auquel les organismes stockeurs sont confrontés. Pour cela, doivent être pris en compte les aspects sanitaires, écologiques mais aussi les aspects économiques. Ceci nous a conduits à proposer divers modules matériels conçus en fonction de leurs usages et une architecture matérielle complète de surveillance ainsi que des logiciels de prédiction, de détection et de diagnostic qui ensemble définissent le système SILOCARE.

Ce Chapitre IV est consacré à l'expérimentation et à la validation de nos propositions : nous avons procédé en quatre grandes étapes :

- **La validation technique en laboratoire** : il s'est agi de vérifier si les modules électroniques répondent bien aux cahiers des charges et d'évaluer leurs performances ;
- **La validation fonctionnelle en laboratoire en présence de grains** : C'est le système SILOTEST 2 qui a été utilisé. Le caisson a été rempli de grains dans lequel nous avons pu contrôler la quantité d'infestation par les insectes. C'est ce type de test en volume très réduit qui a été utilisé pour les mesures acoustiques ;
- **Une campagne de mesures, en mini silo**, conduite avec l'appui de l'entreprise AB7 innovation, avec le double intérêt, pour AB7 d'évaluer les performances des attractifs mis au point dans le contexte ECOSILO et pour le LAAS de pouvoir conduire des essais capteurs avec un suivi des populations d'insectes ;
- **Une campagne de tests dans une cellule de stockage de taille réelle** comprenant 600 tonnes de grains (Silo de LAVAUR) a également pu être conduite afin, de valider dans un premier temps, le bon fonctionnement du prototype complet SILOCARE, et dans un second temps, d'évaluer l'efficacité du système dans l'environnement d'exploitation des organismes stockeurs.

Après la présentation des résultats de ces expérimentations, une analyse des insuffisances sera proposée suivi des perspectives ouvertes pour progresser.

2. Les étapes de validations fonctionnelles des modules capteurs

Tous nos matériels sont des prototypes de laboratoire : ils ont été conçus selon les procédures du Chapitre II et les choix technologiques du Chapitre III. Ils ont été réalisés en collaboration avec notre sous-traitant VALCAP et avec les ateliers de mécanique et d'électronique du Laboratoire. Les modules livrés sont ensuite testés, fonction par fonction, pour être déclarés fonctionnels.

Cas de SILOTEST 1 : liste des fonctions embarquées dont les fonctionnalités ont été vérifiées.

- Température et humidité extérieure ;
- Température et humidité intérieure ;
- Détection optique des insectes piégés ;
- Détection acoustique ;
- Chauffage et Ventilation des attractifs.

Ce module a été notre première proposition sur la base d'une **stratégie de surveillance qui se limiterait à la partie la plus haute du tas de grains** supposée être la plus chaude et donc la plus risquée du point de vue de l'infestation. Nous avions prévu initialement d'implanter le module dans le haut du tas de grains. En fait, cette proposition n'a pas été par la suite retenue par les opérateurs de silo avec les arguments suivants :

- les silos sont remplis par des lots hétérogènes venant de sources de qualités diverses ;
- les grains sont souvent transférés d'une cellule à l'autre et mélangés ;
- on constate pratiquement des développements d'infestations partout dans la hauteur du tas de grains.

Le développement SILOTEST 1 a donc été mis en sommeil avec l'idée qu'il pourrait toutefois être utilement utilisé dans les petits silos à la ferme ou dans les magasinages.

Cas de SILOTEST 2 : c'est un outil conçu pour la **détection rapide de la présence d'insectes au moment de l'ensilage** : l'idée était de prélever quelques kilos de grains de manière répartie dans le lot arrivé et de détecter la présence ou non d'insectes.

Les fonctions embarquées dont les fonctionnalités ont été vérifiées sont : la température et l'humidité, la mesure de CO₂, et la mesure acoustique que nous allons présenter dans le détail. L'originalité de la proposition tenait à la mise en œuvre d'une chambre sourde compte tenu d'un environnement d'usage très bruyant (camions, manutentions,...). Les mesures d'isolement phonique effectuées ont montré une efficacité, par rapport aux bruits environnants, très limitée : des isolements plus sophistiqués seront nécessaires pour accéder, en ambiance non contrôlée, aux niveaux de bruits générés par les insectes. SILOTEST 2 n'a donc pas été testé dans son environnement opérationnel mais utilisé en laboratoire pour mettre au point la sonde acoustique, ce que nous détaillons dans les prochains paragraphes.

Nous reviendrons sur SILOTEST 3, destiné à une surveillance sur toute la hauteur du tas de grain, lors de l'exposé des résultats de surveillance sur le silo de LAVAU.

3. Les résultats obtenus dans les essais de laboratoire

Les résultats des mesures de la température et de l'humidité sont satisfaisants. Ce sont des modules miniaturisés, capables d'atteindre, sur des silos où les évolutions sont très lentes, des précisions extrêmes, notamment en température (sensibilité du dixième voir centième de degré). Les capteurs de températures sont systématiquement utilisés dans les silos mais leurs performances ultimes ne sont pas suffisamment exploitées pour l'instant, dans la perspective de détecter au plus tôt, des comportements anormaux des silos : c'était le sens de nos propositions formulées dans le Chapitre III d'exploiter ces mesures thermiques dans une démarche prédictive de sécurisation de la santé du tas de grains.

L'humidité est un paramètre influent aussi bien dans la croissance des insectes que dans le développement des moisissures. Son influence est prise en compte dans l'exploitation numérique du modèle biologique que nous avons utilisé.

Il est clair pour nous que les capteurs de température et d'humidité ont déjà une place essentielle dans les systèmes de surveillance. Ils sont miniaturisés, bon marché, performants et faciles à répartir dans le volume du tas de grains. La seule limite est que ce sont des sondes faiblement sensibles à la présence d'insectes car elles ne donnent qu'une information générale sur l'environnement qui l'entoure. Ceci étant, les mesures données peuvent dévoiler ou même prédire l'apparition d'un point chaud causé par germination ou par fermentation.

Notre objectif a été d'augmenter la précocité de détection et d'être capable de détecter aussi bien les larves que les insectes adultes.

Une première option est celle de la mesure de CO₂ qui résulte de la combustion énergétique des espèces présentes. L'idée initiale était de placer un capteur unique en fond de silo, pensant que l'on pouvait y récupérer, par l'effet de pesanteur, tout le CO₂ émis ; en fait d'autres expérimentateurs [141] ont constaté que, compte tenu de la lenteur de diffusion et des variations thermiques, le meilleur positionnement du capteur CO₂ doit être situé près du centre de la cellule de stockage. Nous avons donc opté (SILOTEST 3) pour une mesure répartie de CO₂ dans toute la hauteur de la colonne centrale du silo.

Une deuxième option est la mesure du bruit émis par les insectes : le verrou est là essentiellement dans le traitement du signal que nous développerons dans un deuxième temps.

3.1. Les performances de l'analyse de la température et de la concentration en CO₂

La mise au point d'un banc de tests pour ce genre de système n'est pas une chose facile : cela demande de gérer les fournitures en grains, les cultures d'insectes et de disposer d'un mini silo (conteneur

spécial). Dans le cadre ECOSILO, nous devons aussi associer les études de l'entreprise AB7 sur les attractifs et le piégeage des insectes. Cela nous a conduits à travailler conjointement avec l'entreprise AB7. Les expérimentations que nous avons menées, avaient globalement comme objectif de vérifier en milieu de stockage toutes les composantes « jumelles » de la sonde SILOTEST 3 et du module SILOTEST 2 (test rapide).

3.1.1. Description de l'expérimentation

Comme l'entreprise AB7 avait des expériences en cours au sein de ses locaux à Deyme (31) sur les substances attractives, nous avons conçu une expérimentation commune, dans un container mini silo de un mètre cube. Le mini container est équipé des modules thermique-humidité et d'un capteur CO₂ placé en fond de container. Notre objectif était de détecter la présence d'insectes et d'observer leur croissance sur plusieurs semaines. De son côté, AB7 expérimentait des attractifs et le piégeage des insectes par des pièges passifs ce qui permet d'accéder au nombre d'insectes présents dans le grain.

3.1.1.1. Préparation du grain

Un lot de 650 Kg de blé bio de la même année (2014) non traité et ne contenant pas de trace de résidus pesticides a été utilisé pour cette expérience. Dans le but d'assurer une absence complète de toute forme d'infestation le lot de grain devrait être refroidi à une température de -22 °C (température d'un congélateur) pendant une journée complète. Cette manipulation, voir Chapitre I, élimine tous les insectes adultes présents dans le lot ainsi que les formes cachées.

Le grain a été par la suite stocké dans un conteneur en PVC d'un mètre cube de volume et placé dans une salle étanche avec une température maintenue à 25 °C.

3.1.1.2. Calibration du capteur de CO₂

Un module de la sonde SILOTEST 3 intégrant les quatre mesures, à savoir, Température, Humidité, CO₂ et le Son a été utilisé afin de surveiller le grain stocké pendant toute la durée de l'expérimentation. La Figure 51 montre l'installation de mesure multi-capteurs utilisée pour la réalisation de cette expérience.

Le capteur de CO₂ nécessite une calibration avant exploitation. Pour ce faire, nous avons utilisé une boîte à gants permettant de mettre le capteur dans un environnement ne comprenant que de l'Argon. Le capteur est donc calibré par rapport à 0 ppm de CO₂.



Figure 51 : Banc de test mis en place avec l'entreprise AB7

3.1.1.3. Mise en œuvre de l'expérimentation

Cette manipulation qui a duré plus d'un mois, a commencé le 12/09/2014 et a duré jusqu'au 18/10/2014. Le module de la sonde SILOTEST 3 a été placé en fond du conteneur. Pour la récupération des données, nous avons connecté ce module à un PC où une application informatique permet l'enregistrement dans une base de données MySQL et la visualisation en permanence des données issues des capteurs installés.

Des tubes pièges, en nombre de six ont étaient placés à distance régulières dans la transversale afin de surveiller le degré d'infestation du lot de grain. Aussi, un agent a été chargé de faire des prélèvements dans le but de suivre, par comptage direct des insectes, le développement de l'infestation du grain. Pour ce faire, une vingtaine de kilogramme (26 Kg) de blé est manuellement prélevée puis tamisée à l'aide d'un tamis garni de toile inox (ouvertures de 1,80 mm) et équipé d'un fond ramasseur pour récupérer et compter les insectes séparés. Cela donne une estimation très précise du degré de l'infestation en nombre d'insectes par kilo.

Parallèlement, notre objectif était de suivre pas à pas l'évolution de la concentration du CO₂ en fonction du degré d'infestation du grain, à partir d'une infestation quasi nulle car nous allons quand même observer la présence initiale d'insectes avant toute introduction contrôlée de grains infestés due à des erreurs de préparation ou autres.

3.1.1.4. Infestation du lot de grain

L'infestation du grain a été réalisée artificiellement par l'introduction directe d'insectes dans le tas de grains :

- de 50 grammes de grain infestés le 15/09/2014 ;
- de 50 grammes de grain infestés le 18/09/2014 ;
- de 100 insectes adultes le 22/09/2014.

Tous les insectes introduits dans le lot de grain sont de la même espèce (charançons de riz) et issues de l'élevage d'AB7.

Ce protocole d'infestation a été établi par les équipe de AB7, compte tenu de l'objectif de tester l'effet des attractifs sur les déplacements des charançons.

Les résultats qui en découlent seront présentés dans les prochains paragraphes.

3.1.2. Influence de l'humidité

On voit sur la Figure 52, l'enregistrement du taux d'humidité relative inter granulaire sur toute la durée de l'expérimentation. Tout d'abord, nous remarquons que la teneur en eau équivalente calculée selon l'équation de *Chung-Pfost* [131], est inférieure à 0.14 ce qui permet de dire qu'il n'y aura pas dans l'expérience d'effets de moisissures [138], [152]. Un deuxième point intéressant est que l'on enregistre une baisse lente de l'humidité, c'est-à-dire un assèchement des grains ce qui est un indicateur de l'évaporation dû à la croissance de la température du tas de grains.

Notons enfin que la mesure de l'humidité est opérationnelle et **qu'elle renseigne très bien le modèle biologique** que nous préconisons d'appliquer à la surveillance des silos.

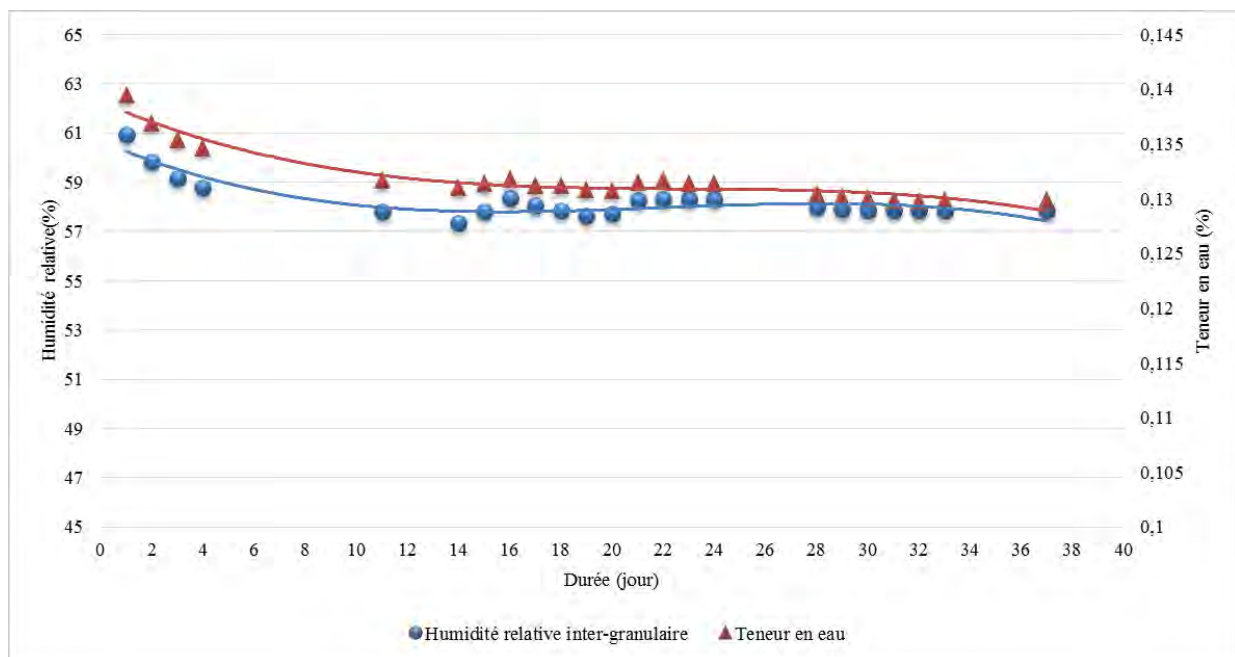


Figure 52 : Humidité relative inter granulaire et teneur en eau du grain durant l'expérimentation

3.1.3. L'évaluation de la population des insectes

Il est connu que, théoriquement, le calcul de l'évolution de la population d'insectes à partir d'une population initiale est réalisable. Dans le cas de notre expérimentation, à l'évidence, il s'est opéré une pollution dans sa préparation ce qui fait qu'il y a une densité a priori inconnue dans le mini silo. L'autre difficulté d'analyse est liée au fait que les prélèvements induisent une évolution perturbée de la concentration : en effet à chaque prélèvement nous enlevons des insectes ce qui réduit la dynamique de prolifération, de même que l'on perturbe la thermique et l'équilibre des gaz dans le silo, dont celui du CO₂.

Nous partons donc du premier prélèvement et nous calculons, selon le modèle biologique de référence l'évolution théorique qui aurait été celle s'il n'y avait pas eu de prélèvement, cette courbe tient compte des influences de l'évolution de la température environnante ainsi que de l'humidité. Il s'agit là d'une simple courbe de référence qui illustre la croissance théorique sur la durée de l'expérimentation.

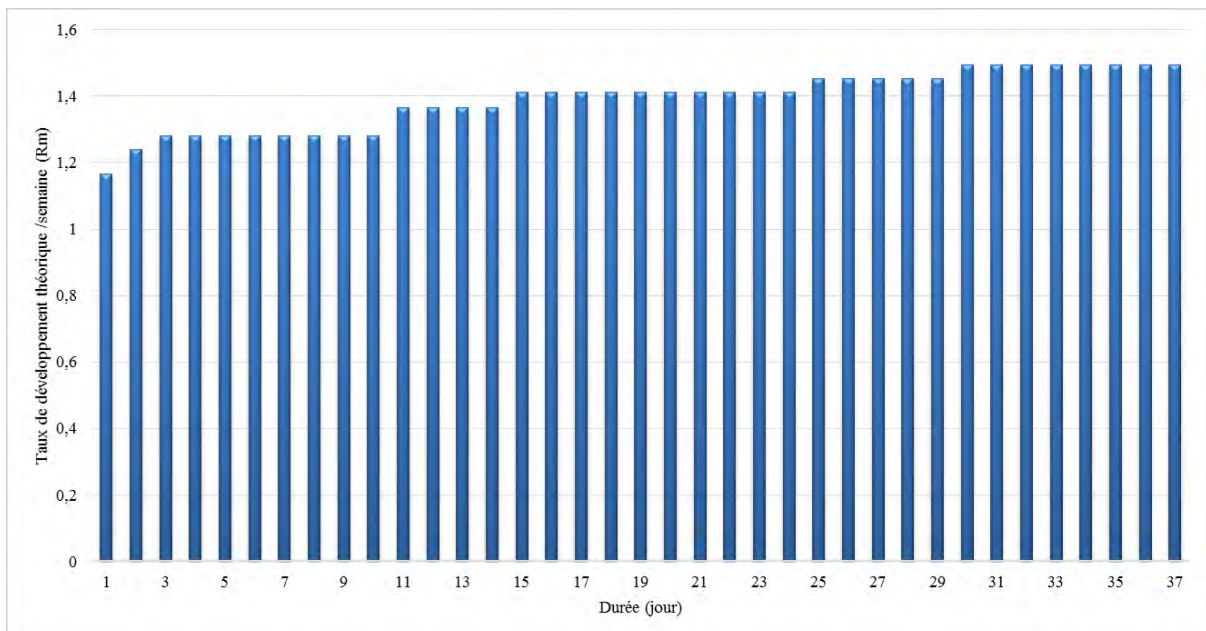


Figure 53 : Evolution théorique du taux de développement (R_m) des charançons pendant l'expérimentation

Comme présenté dans le Chapitre II, l'évolution de la population d'insectes est calculée en fonction d'un taux de développement (R_m). L'évolution de ce paramètre est présentée dans la Figure 53.

La multiplication potentielle de la population est estimée à environ 1558 entre le premier et le dernier jour de l'expérimentation. La courbe de la Figure 54 est construite de manière théorique avec une population initiale de un insecte supposée, ce qui reste une hypothèse sur la densité initiale d'insectes.

Une courbe corrigée de l'influence des prélèvements répertoriés est illustrée par la Figure 55. Cette courbe est obtenue dans les mêmes conditions avec un nombre d'insectes initial estimé entre 70 et 85 insectes. Nous appliquons strictement les effets des interventions humaines dans le silo, soit pour des injections d'insectes, soit pour des prélèvements.

$$N = N_0 e^{(R_m * t)} \quad \text{Équation 3-1}$$

Nous avons fait figurer sur la courbe obtenue (Figure 55) de la population d'insectes en fonction du temps, la date et l'amplitude des manipulations perturbantes. Nous pouvons observer, une baisse significative par rapport à la courbe de croissance. Cette baisse de la dynamique du développement est de l'ordre de 290 fois.

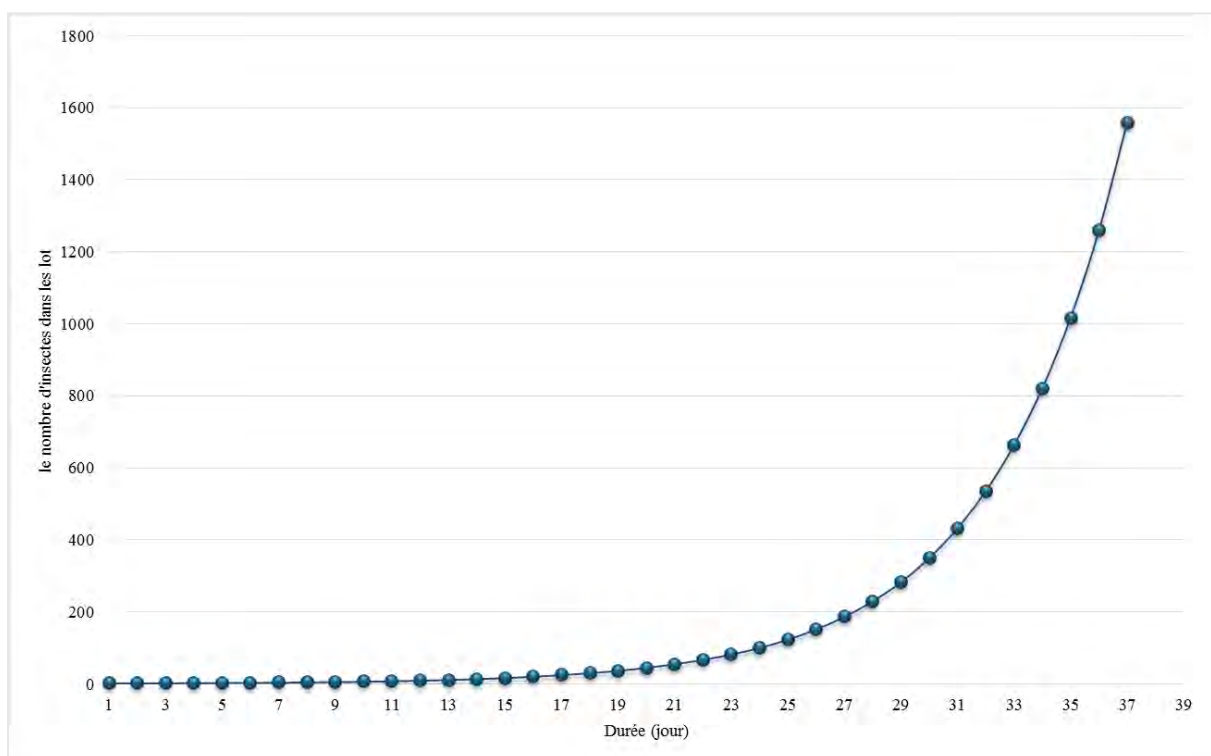


Figure 54 : Taux de multiplication théorique des insectes durant l'expérimentation

Compte tenu de l'incertitude de l'infestation initiale, nous avons calé cette courbe sur la valeur du premier prélèvement duquel nous avons déduit les infestations de démarrage, ce qui donne une population initiale comprise entre 0,1 et 0,135 insectes par Kg (70 et 85 insectes dans la totalité du lot). Cette présence est justifiable car les températures enregistrées le premier jour de l'expérimentation ont été de l'ordre de 18°C donc loin d'être létales pour les insectes (les charançons). Nous allons donc vérifier cette affirmation par la concentration de CO2.

Toutes les interventions effectuées dans le silo perturbent évidemment les estimations que nous pouvons en déduire : Pour la suite de l'analyse, nous retenons les caractéristiques suivantes :

- Infestation initiale supposée comprise entre 0,1 et 0,135 insectes/Kg ;
- Taux de multiplication des insectes compris entre 11 et 290 fois ;
- La courbe présentée dans la Figure 55 qui résume les interventions, leurs dates ainsi que la courbe de croissance corrigée par le calcul.

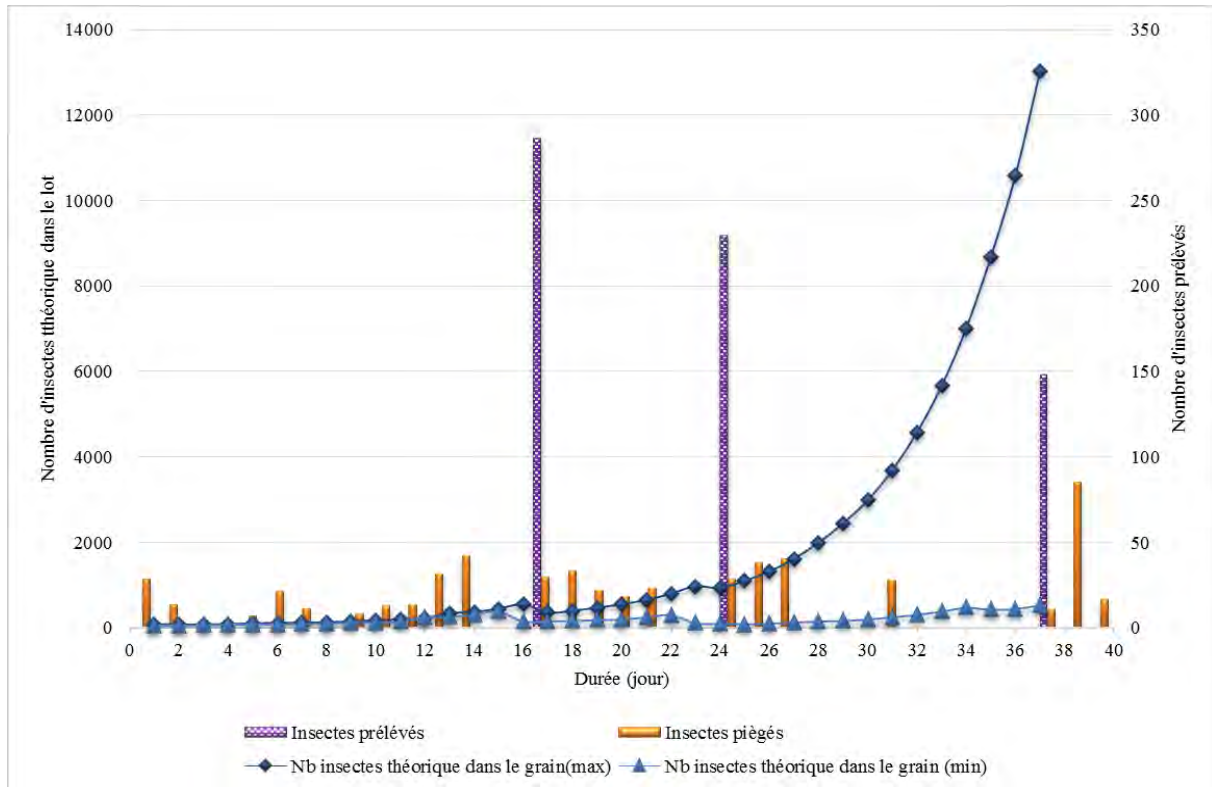


Figure 55 : Evolution théorique du nombre d'insectes en fonction des prélèvements réalisés

3.1.4. La température comme détecteur de la présence d'insectes

La température a été enregistrée tout au long de l'expérimentation (Figure 56). Nous observons une lente croissance de la température ce qui peut s'expliquer par le fait que le grain a été introduit dans la chambre de mesure à 18°C et que la température de la chambre était à 25°C.

Nous voulons voir si cette observation s'explique complètement par ces seules considérations thermiques et si la présence d'insectes que nous savons importante est détectable dans le comportement thermique du silo. Nous appliquons la procédure que nous avons imaginée et que nous avons explicitée dans le deuxième chapitre :

- Apprentissage du modèle thermique dès le début de l'enregistrement ;
- Extrapolation du modèle thermique afin de prédire l'évolution théorique de la température ;
- Comparaison à la mesure réelle.

Cette comparaison entre la température du grain prédite par le modèle thermique avec et sans apprentissage ainsi que celle mesurée par le capteur est présentée dans la Figure 56. Pour pouvoir plus facilement analyser ces écarts, nous avons mathématiquement lissé la courbe expérimentale ; l'apprentissage des paramètres du modèle a été effectué sur les données des 4 premiers jours de

l'expérimentation. Un écart de 1,72°C entre la température mesurée et celle prédite par le modèle sans apprentissage contre 1,44°C par le modèle en appliquant l'apprentissage est enregistré au dernier jour d'expérimentation sachant que la température mesurée a dépassé la température ambiante de 1,31°C.

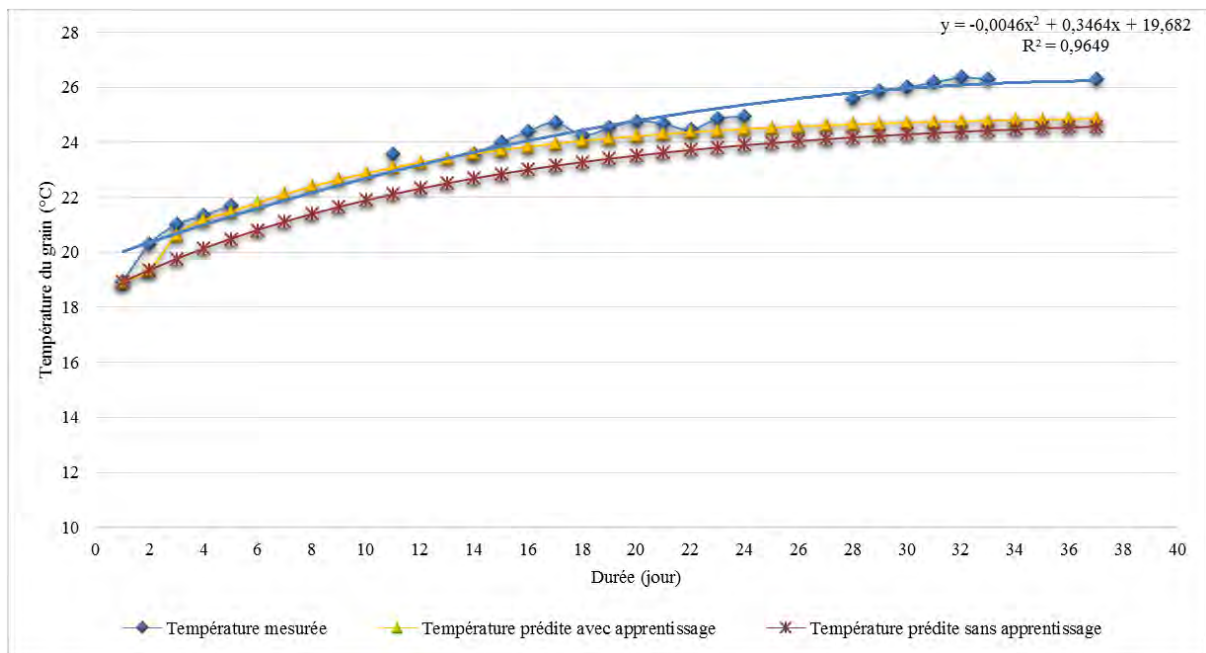


Figure 56 : Présentation des températures mesurées, prédites sans apprentissage et prédites avec apprentissage

L'écart de température constatée entre la température réelle est la prédiction doit donc être interpréter comme le résultat de la présence d'insectes.

Peut-on estimer par cet écart de température, la densité d'insectes présents dans le tas de grain ?

Nous savons que la respiration d'un insecte délivre 1 µl de CO₂ par minute et que l'énergie dissipée par l'émission d'une molécule gramme (22,4 l) de CO₂ est de 470 KJ [138], [153]. Nous pouvons donc calculer, si l'on connaît le nombre d'insectes dans le silo, l'énergie thermique qui y est émise par tous les insectes réunis :

$$N \times E = \Delta T \times m \times C \quad \text{Équation 23}$$

Nous considérerons donc que l'effet de la présence d'insectes induit une "**surélévation de température**" de :

$$N = E / (\Delta T \times m \times C) \quad \text{Équation 24}$$

Où :

- ΔT correspond à la variation de la température après l'échange d'énergie exprimée en degré Celsius (°C) ;
- N le nombre d'insectes présents dans le lot de grain ;

- E est l'énergie thermique dégagée par un insecte, exprimée en joule (J) ;
- m est la masse du corps, exprimée en kilogramme (kg) ;
- C est la capacité thermique massique du blé. C est exprimée en Joule par degré Celsius par kilogramme ($J.C^{-1}.kg^{-1}$).

Sur ces bases, la dynamique de l'écart thermique dans le temps donne une évaluation de : N= 35 insectes/kg au dernier jour de l'expérimentation.

L'évolution de l'influence des insectes sur la température du grain calculée à partir de l'énergie produite par les insectes est présentée dans la Figure 57. Nous précisons que ces calculs ont été faits sur la base des postulats précédemment présentés. L'erreur dans le calcul de l'énergie produite par les insectes est due à l'incertitude quant au nombre d'insectes présent a priori dans le lot de grain. **En conclusion, cette analyse des résultats du suivi thermique montrent qu'il est possible, par mesure de l'écart entre les valeurs courantes et les valeurs théoriques d'un modèle supposé sans insecte, de mettre en évidence l'énergie dissipée par les insectes et d'en évaluer le nombre connaissant l'énergie dissipée par chacun d'eux.**

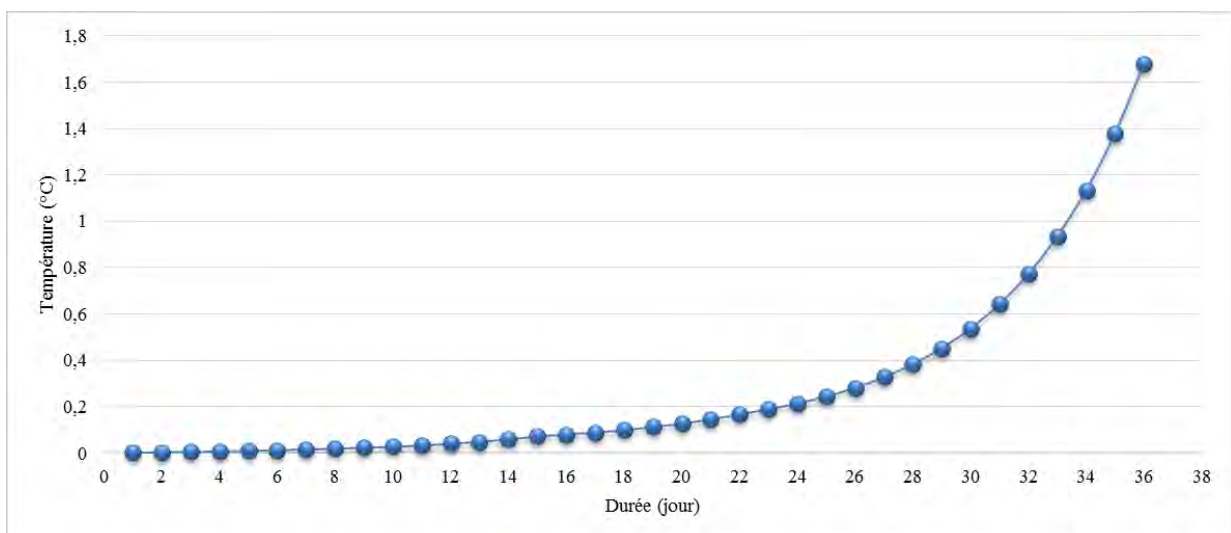


Figure 57 : Influence de l'énergie dégagée par les insectes sur la température du grain

3.1.5. Le CO2 comme détecteur de la présence d'insectes

La concentration du CO2 initiale mesurée est de 355 ppm, ce qui représente la concentration naturelle du CO2 dans l'atmosphère. Cette concentration a augmenté tout au long de l'expérimentation du premier jour jusqu'à observer la saturation du capteur à 2000 ppm.

Nous remarquons, comme pour le développement des insectes, que l'évolution de la concentration du CO2 suit une fonction exponentielle. La courbe de la Figure 58 présente cette évolution tout au long de l'expérimentation.

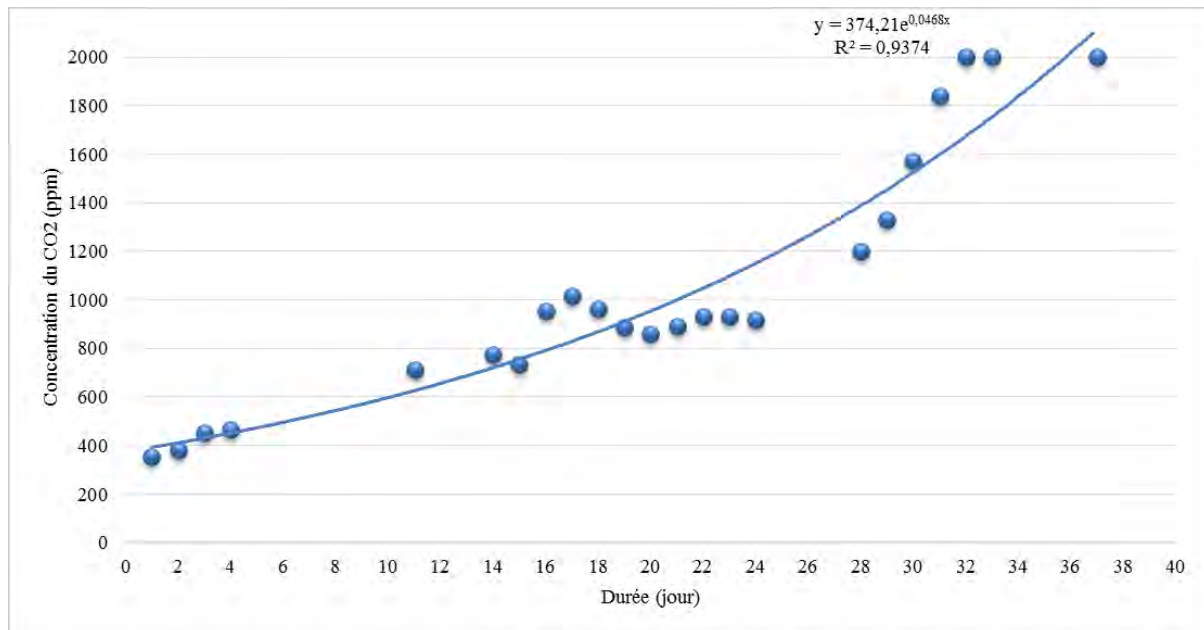


Figure 58 : Evolution de la concentration du CO2 dans le grain

Cet accroissement continu important ne peut, dans les conditions de l'expérience, qu'être interprété que comme le résultat de la production de CO2 liée aux larves et insectes présents dans le mini silo.

Un premier chiffre brut peut être extrait de l'expérimentation : une évaluation factuelle, dans notre expérimentation, de **la sensibilité de détection en ppm par insecte/kilo**, en introduisant les populations estimées précédemment d'insectes.

Voyons maintenant comment s'explique ce chiffrage en analysant les conditions de l'expérience et en partant des fondements biologiques que nous avons à disposition :

Imaginons un insecte seul : quelle valeur de CO2 devrait théoriquement être constatée sur 24 h ?

- Nous connaissons la production de CO2 unitaire d'un insecte : Un insecte produit 1400 μ l de CO2 par jour [141].
- Connaissant la valeur du coefficient de diffusion D du CO2 dans le grain qui est de l'ordre de $5,9-7,6 * 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ ce qui équivaut à 0,5 – 0,66 m²/jour, ce qui conduit, à un espace de diffusion du CO2 d'environ 0,3 m³/jour [154].

La variation de la concentration du CO2 provoquée par la respiration d'un insecte représente 2215 ppm jour dans un volume de 1,3 litre (1 Kg de grain). Sachant que l'air inter granulaire représente 40% du volume global occupé par le blé, nous devrions observer donc un accroissement de CO2, en supposant que le CO2, bien qu'il pèse plus lourd que l'air, a tendance dans le grain à diffuser dans tous les sens principalement vers le bas et latéralement [127] ; environ 11 ppm par insecte et par jour.

On voit, par ce calcul rapide, que la détection par CO2 de la présence d'insectes est potentiellement extrêmement sensible, grâce à :

- l'effet intégrateur : un insecte, avec une sensibilité du détecteur de 50 ppm, serait détecté en moins d'une semaine dans un volume de moins de un mètre cube ;
- à l'effet cumulatif sur le nombre d'insectes, dix insectes dans le mini silo seraient détectés en 24 h.

L'expérimentation que nous avons conduite ne vérifie pas ces chiffres et présente des mesures d'un rapport important (152) par rapport à la théorie. Nous pensons que le mini silo, qui n'est pas prévu pour étancher le CO₂, perd le gaz qui diffuse sur la partie basse.

Dans le cas de notre expérimentation, le CO₂ émis par les insectes est rapidement évacué et ne reste dans le silo que du CO₂ résiduel proportionnellement au CO₂ émis en permanence. En fait, ce que nous mesurons doit être proportionnel au nombre d'insectes. Ceci est bien corroboré par le fait que les prélèvements d'insectes sont bien visibles dans la courbe de réponse de la Figure 59 que nous avons comparé au calcul de la densité d'insectes présents dans le mini silo.

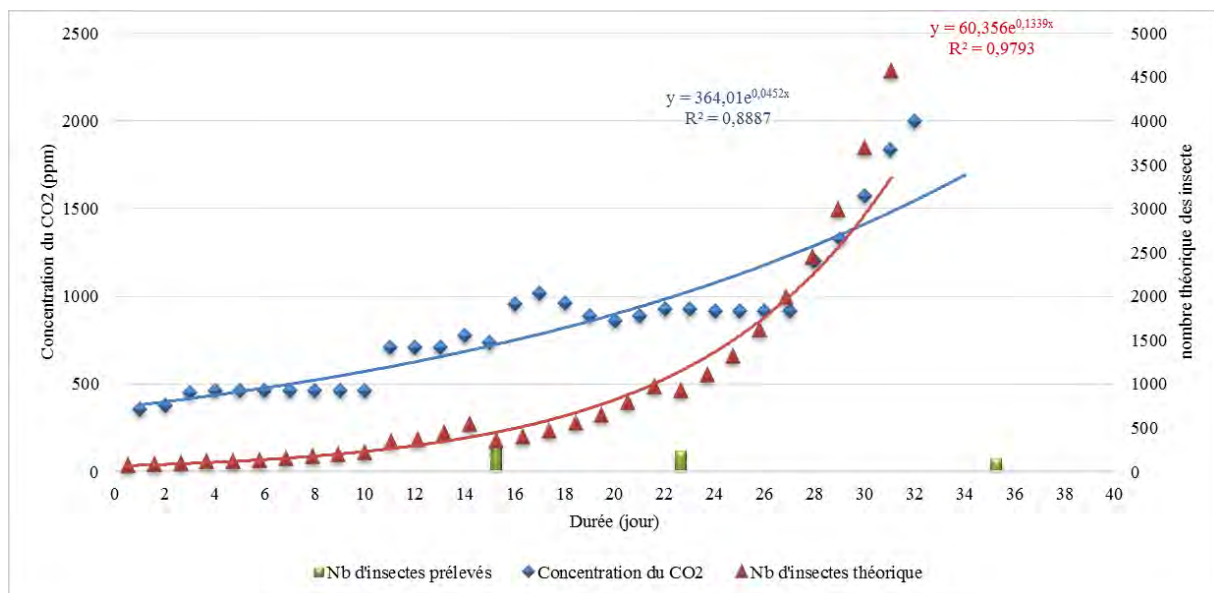


Figure 59 : Comparaison de la concentration du CO₂ mesurée par rapport au nombre d'insectes

Malgré la perte apparente du CO₂, nous pouvons conclure à partir de la Figure 59 qu'il y a une forte corrélation entre le nombre d'insectes et la concentration du CO₂.

En résumé, la mesure de CO₂ a parfaitement bien détecté la présence d'insectes, proportionnellement à leur nombre, mais avec une sensibilité moindre que celle que prédite par la modélisation. Nous devrions être capables de détecter moins de un insecte par kilo avec un capteur de CO₂ sensible à 50 ppm alors que l'expérience ne permet de détecter que 152 fois moins.

Dans nos résultats, nous ne percevons pas l'effet intégrateur de la détection qui, s'il n'y a pas de pertes de CO₂ doit rapidement atteindre la saturation du capteur (2000 ppm). En fait, ces fuites sont telles qu'elles ne laissent dans le mini silo que des résidus proportionnels à l'émission CO₂, ce qui est corroboré par la relation CO₂/nombre d'insectes.

Toutes ces expérimentations valident bien la pertinence des mesures de T° et de CO₂ pour la détection. Mais il faudra dans les usages qui peuvent être faits, prendre des précautions nouvelles, notamment pour la mesure du CO₂ : si l'on veut utiliser la pleine sensibilité de la méthode, il faut au moins étanchéifier le fond de cuve pour y conserver le CO₂ et bénéficier à plein de l'effet intégrateur.

Dans notre expérimentation, nous pouvons relever les imperfections suivantes :

- La préparation n'a pas permis d'éliminer correctement les insectes initialement présents ;
- L'entreprise AB7 avait comme objectif de tester l'efficacité des attractifs synthétisés, ce qui a rajouté des interventions dans le mini silo qui ont aussi perturbé les mesures ;
- Les charançons ont été introduits manuellement. De surcroît, sous l'effet des attractifs, ils sont restés plutôt proches de la surface et comme les prélèvements ont été effectués dans ces mêmes zones, le taux d'infestation est plus élevé que nos estimations qui portent sur l'analyse de la totalité du volume.

3.2. La mise au point et les performances en détection de la sonde acoustique

Cette étude a été réalisée sur l'installation SILOTEST 2 selon deux objectifs : mettre au point la sonde acoustique matériels et logiciels, et valider le module SILOTEST 2. Le caisson anéchoïque pour la détection acoustique rapide des insectes présenté dans le chapitre précédent peut contenir jusqu'à 10 Kg de grains et enregistrer le signal acoustique à l'intérieur du récipient en deux emplacements différents comme montré dans le Chapitre III.

Pour les tests menés au LAAS, nous n'avons utilisé que le capteur du bas car la quantité de grain utilisée est de deux Kg. Notre cahier des charges est d'accéder à la détection d'un insecte par Kg présent dans le tas de grain : il est donc essentiel d'être sûr d'une situation de référence à 0 insectes. Pour ce faire, le grain est refroidi dans un congélateur pendant une journée complète (24 h) à une température de -22 °C. Après avoir procédé à l'élimination de toutes formes de présence d'insectes, nous avons introduit insecte par insecte et nous avons réalisé plusieurs enregistrements acoustiques qui ont été traités automatiquement par le logiciel développé.



Figure 60 : Chaîne d'acquisition des signaux acoustiques

Nous avons, pour réaliser l'expérience, développé une chaîne d'acquisition du signal (Figure 60). Le signal détecté par le capteur acoustique est amplifié par un amplificateur. Le signal amplifié est ensuite envoyé à une carte d'acquisition qui convertit le signal analogique en un signal numérique.

Enfin, l'ordinateur récupère le signal numérique via une liaison USB avant de le stocker dans un fichier au format CSV.

Afin d'automatiser l'acquisition, nous avons développé une interface graphique à l'aide de l'environnement de développement d'interfaces utilisateurs graphiques de Matlab 2013 pour piloter la communication et les enregistrements de données. Dans le but de gagner du temps, nous avons utilisé une carte de développement Fabiano SD comme module d'acquisition (Figure 61). Cette carte dispose d'un PIC32 cadencé à 80MHz suffisamment puissant pour gérer deux canaux d'enregistrement de signaux acoustiques. La communication est assurée par l'émulation d'une communication série à travers une liaison physique USB que propose la plateforme chipKIT (voir annexe B), cette liaison est reconnue comme un port COM au niveau du système d'exploitation. La plateforme chipKIT propose un environnement de développement très convivial et facile d'utilisation car elle dispose de plusieurs bibliothèques prêtes à être utiliser.

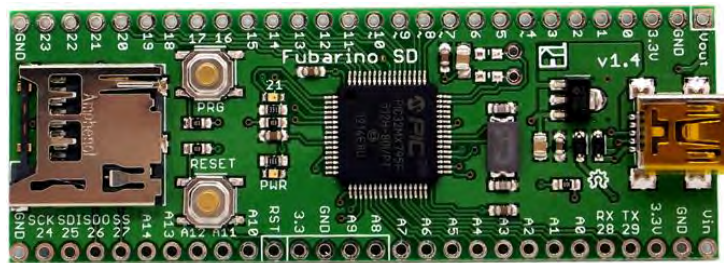


Figure 61 : Carte Fubarino SD

À partir de l'interface graphique développée (Figure 62), la modification des paramètres suivants est possible :

- La fréquence d'échantillonnage ;
- La fréquence d'enregistrement ou l'intervalle de temps entre deux enregistrements successifs ;
- Les numéros des voies sur la carte d'acquisition à prendre en compte ;
- Le nom et la durée de chaque enregistrement.

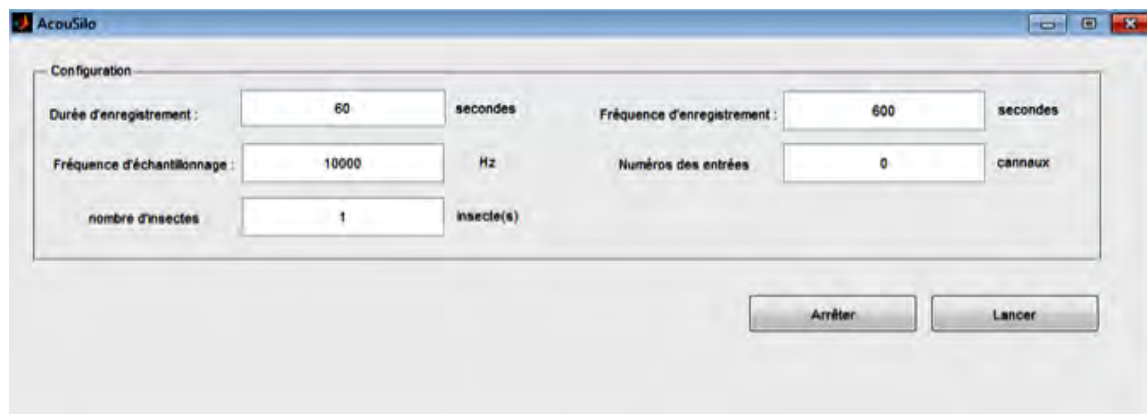


Figure 62 : Interface de gestion des enregistrements acoustiques

Les résultats de traitement des signaux enregistrés sont stockés de façon automatique dans la base de données du logiciel SILOSOFT afin que ce dernier puisse récupérer puis afficher les résultats pour l'utilisateur final.

Tous les enregistrements sont effectués à une température de 25°C avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz qui respecte le théorème de Shannon ($F_s > 2 F_{max}$) car la bande utile des bruits d'insectes est comprise entre 1 kHz et 4 kHz.

Toutes les analyses réalisées sur les enregistrements acoustiques sont effectuées avec le logiciel Matlab 2013.

3.2.1. Analyse du signal dans le domaine temporel

Dans le domaine temporel, les signaux générés par les insectes se présentent sous forme d'impulsions d'amplitude variable. La durée des impulsions est comprise entre 3 et 5 millisecondes comme le montre la Figure 63.

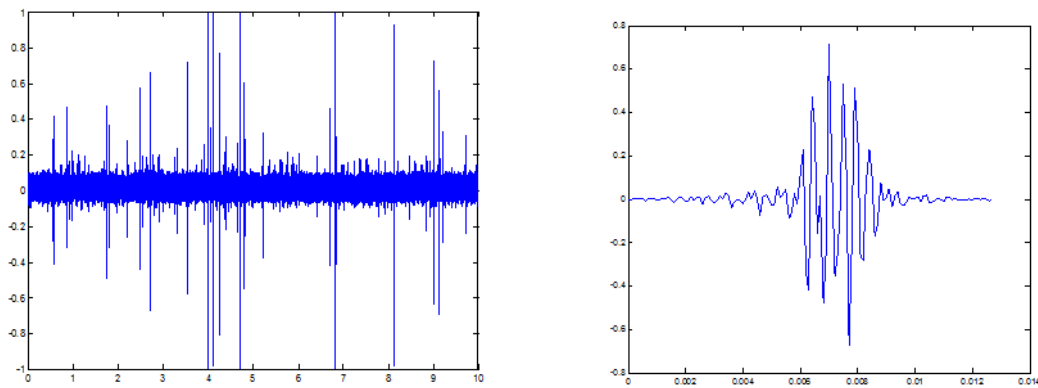


Figure 63 : Signal temporel généré par les insectes

3.2.2. Analyse du signal dans le domaine fréquentiel

Dans le domaine fréquentiel, le spectre du signal produit par l'insecte est présenté dans la Figure 64. Le spectre obtenu présente deux pics centrés autour des fréquences 2,1 kHz et 3,3 kHz. À partir du relevé, nous pouvons déterminer la bande utile du signal d'insecte qui se trouve dans une bande comprise entre 1 kHz et 4 kHz. Ce résultat est en complète concordance avec les données trouvées dans la littérature concernant le bruit généré par les charançons [91]. Dans le but de réduire l'effet de bord, une fenêtre de Hamming est appliquée sur cette séquence avant d'effectuer la TFD (Transformée de Fourier Différentielle).

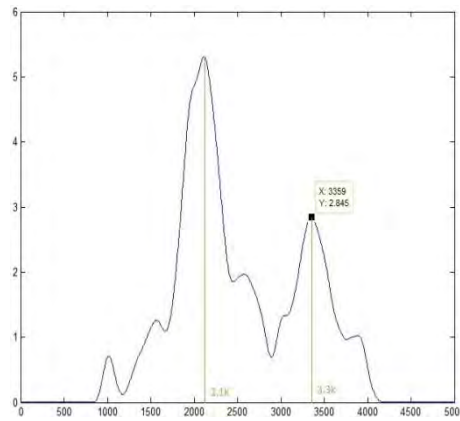


Figure 64 : Le spectre fréquentiel d'un signal d'insecte

Le signal produit par les insectes est un signal non-stationnaire, une simple transformée de Fourier ne peut donner des informations complètes sur la signature de ce bruit. Une analyse plus approfondie s'impose donc.

3.2.3. Analyse du signal dans le domaine tempo-fréquentiel

Pour ce faire, nous avons appliqué dans une première étape une méthode temps-fréquence qu'est la transformée de Fourier à court terme (STFT). Sous Matlab, les paramètres de la fonction STFT choisis sont les suivants :

* *Fenêtre de pondération* : la fenêtre de Hamming est utilisée pour réduire le phénomène de discontinuité aux frontières (l'effet de bord).

* *Taille de la fenêtre* : elle doit être supérieure à la durée de l'impulsion de l'insecte (3-5 millisecondes). De plus, le signal acoustique est considéré comme localement stationnaire dans un petit segment de 20-40 ms [155], alors la taille de segment choisie sera de 25 ms avec un décalage de fenêtre de 10 ms.

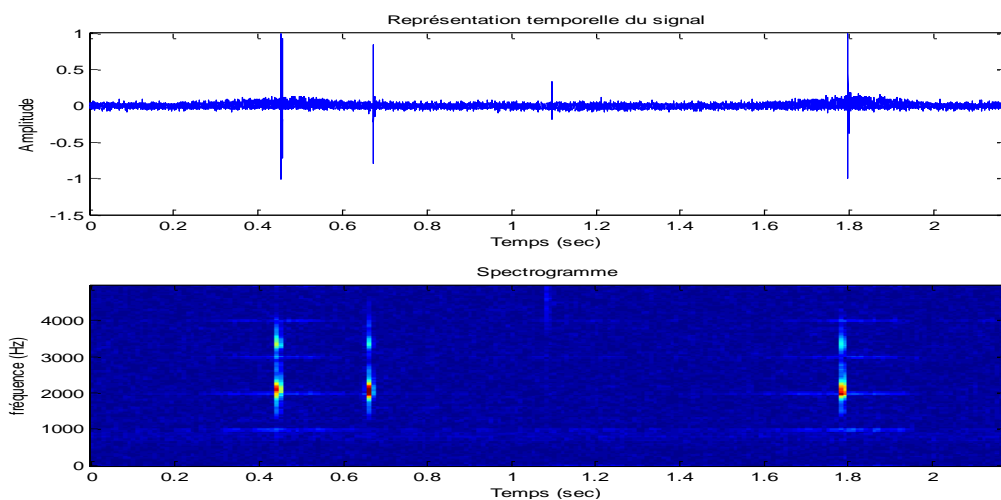


Figure 65 : Analyse temps-fréquence des signaux générés par les insectes

À partir de l'analyse temps-fréquence de la Figure 65, nous constatons que le spectrogramme présente des raies verticales dont les positions correspondent aux positions des impulsions présentes dans le domaine temporel et que l'énergie est concentrée autour des fréquences 2,1 kHz et 3,3 kHz, ce qui correspond aux 2 pics d'énergie que l'on peut apercevoir également dans le domaine fréquentiel.

Nous venons de présenter des généralités sur le signal acoustique produit par les insectes. Comme présenté dans le deuxième chapitre, nous avons opté pour une détection acoustique moyennant la méthode MFCC pour l'extraction de la signature du bruit d'insectes et la méthode de classification GMM pour la reconnaissance et la détection des signatures. Bien que plusieurs méthodes puissent être utilisées pour cette même application notre choix est motivé par la réflexion suivante : les premiers systèmes développés pour la détection acoustique d'insectes se résumaient à l'utilisation d'un microphone épaulé par une bonne amplification. Pour la détection, elle se faisait par l'ouïe à l'aide de casques audio. Ceci représentait une première étape essentielle dans ce domaine, qui a prouvé que le bruit généré est un bruit situé dans la gamme des sons audibles. Comme l'appareil auditif humain perçoit les sons suivant une échelle de Mel nous avons pensé qu'il était aussi possible que les sons générés par les insectes soient détectables de la même manière.

3.2.4. Validation de la méthode de détection acoustique

La démarche adoptée au Chapitre II, pour la détection acoustique, peut être résumée par les points suivants :

- *Prétraitement* : la première étape dans tout système de reconnaissance acoustique consiste à éliminer les signaux parasites. Nous avons utilisé pour cela un filtre passe-bande dans un premier temps puis effectué un débruitage par la méthode MMSE ;
- *Segmentation* : le signal prétraité est divisé en petits segments dans le but de réduire le temps de calcul. Comme présenté dans le deuxième chapitre, seuls les segments présentant une activité d'insectes sont traités ;
- *Extraction de signatures* : Les segments obtenus sont ensuite divisés en fragments qui se recouvrent. La MFCC est appliquée sur les fragments pour en extraire les coefficients MFCC ;
- *Classification* : les coefficients MFCC au nombre de 12 qui sont extraits des fragments sont classifiés par la méthode GMM dans différentes classes (clusters).

Le schéma de la Figure 66 rappelle la démarche suivie pour le traitement des signaux acoustiques : nous allons voir comment elle a été mise en œuvre :



Figure 66 : Chaîne de traitement des signaux acoustiques

3.2.4.1. Prétraitement

a. Filtrage

En utilisant un filtre passe bande numérique, il est possible de supprimer les composantes des signaux dont les fréquences sont en dehors de la bande utile. Il existe plusieurs familles de filtres dont chacune possède des caractéristiques différentes (Figure 67). La synthèse des filtres à RII (réponse impulsionnelle infinie) est réalisée à l'aide de fonctions proposées par Matlab.

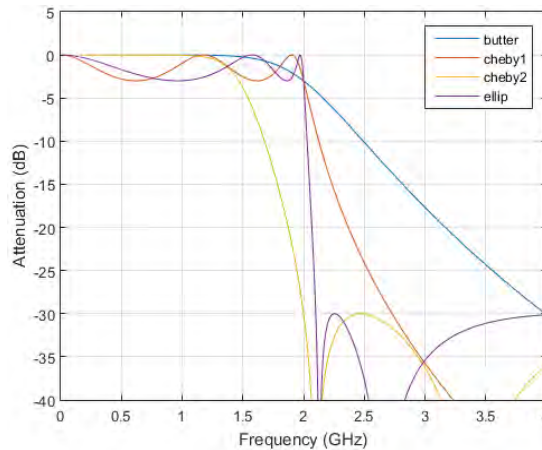


Figure 67 : Spectre des différents filtres numériques

Le filtre choisi est le filtre elliptique car il présente la bande de transition la plus étroite.

$$[b, a] = \text{ellip}(n, R_p, R_s, W_n)$$

Le R_p exprime en dB l'ondulation de la bande passante du filtre : la valeur de ce paramètre doit être faible (0,1 dB). R_s est l'atténuation minimale dans la bande coupée (64 dB), et l'ordre du filtre $n=8$. Le terme W_n définit la bande de fréquence passante [1 kHz, 4 kHz].

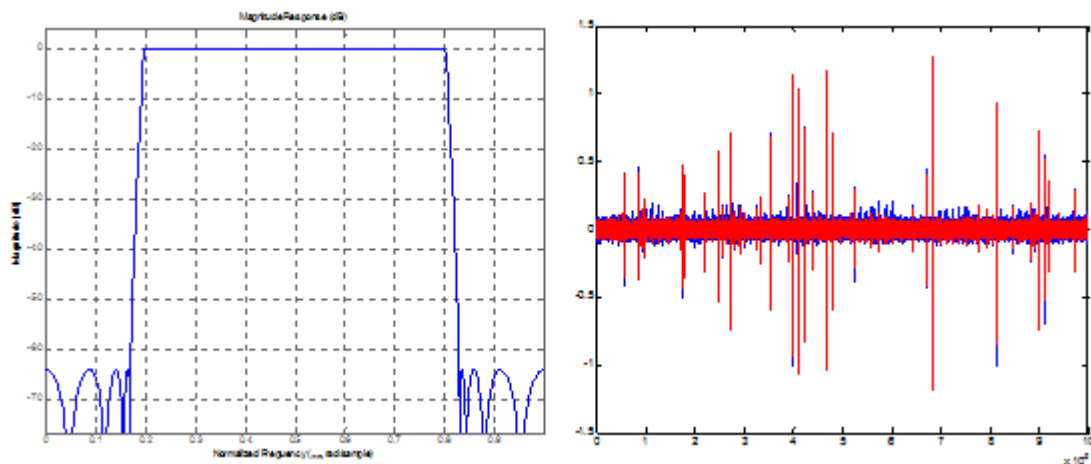


Figure 68 : Signal avant et après filtrage numérique

Comme l'illustre la Figure 68, on constate qu'après avoir passé le filtre passe-bande, on peut supprimer une petite partie du bruit de fond.

b. Débruitage du signal-MMSE

Le filtre passe-bande permet de réduire une partie du bruit. Cependant, il en reste encore dans la bande de fréquence utile. On utilise la méthode MMSE pour effectuer le dé-bruitage du signal. Cette étape est réalisée à l'aide de la toolbox VOICEBOX pour Matlab.

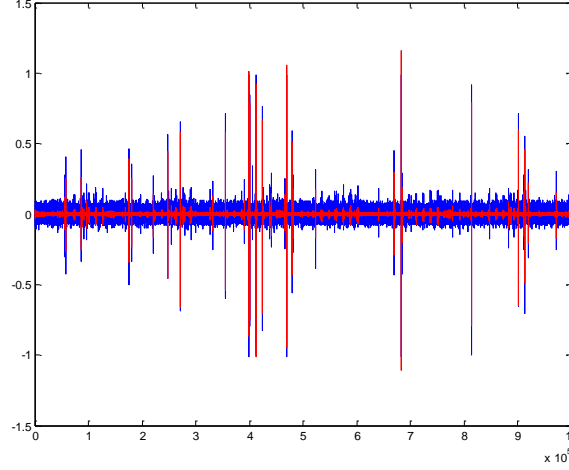


Figure 69 : Superposition du signal avant débruitage (en bleu) et après débruitage (en rouge)

Il est clair qu'après l'étape de débruitage, le bruit de fond est davantage réduit.

3.2.4.2. Segmentation du signal

La durée des enregistrements réalisés est de 100 secondes. L'application de la méthode d'extraction de signature sur la totalité du signal rend le temps de calcul très élevé. L'étape de segmentation a pour but de réduire considérablement ce temps de calcul : l'enregistrement est divisé en un certain nombre de segments contenant des impulsions. Pour ce faire, l'enregistrement est divisé en sous-segments de taille k . ces sous segment vont permettre de définir le début du segment contenant une ou plusieurs impulsions.

Dans le domaine temporel, le signal d'insecte a une amplitude plus importante que le bruit de fond, c'est à dire que l'énergie dans le sous-segment contenant des impulsions est plus importante. La segmentation est basée sur un détecteur d'activité dans le signal qui estime l'énergie E de chaque sous-segment qui contient K échantillons successifs :

Afin de décider si un sous-segment contient ou non des impulsions, nous avons défini un seuil s . Si l'énergie du sous-segment est supérieure au seuil, nous considérons que le sous-segment contient un bruit qui pourrait être émis par un insecte et nous mettons la valeur du vecteur détecteur D à 1, pour le cas contraire 0. Nous rappelons que le seuil est calculé comme suit.

$$Seuil = 10\% \max(E(k))$$

$$Détecteur D(k) = \begin{cases} D(k) = 1 & \text{si } E(K) > s \\ D(k) = 0 & \text{si non} \end{cases}$$

Les enregistrements sont donc divisés en plusieurs segments d'une durée fixe de 1.2 dont la première composante (sous-segment) doit être marquée 1

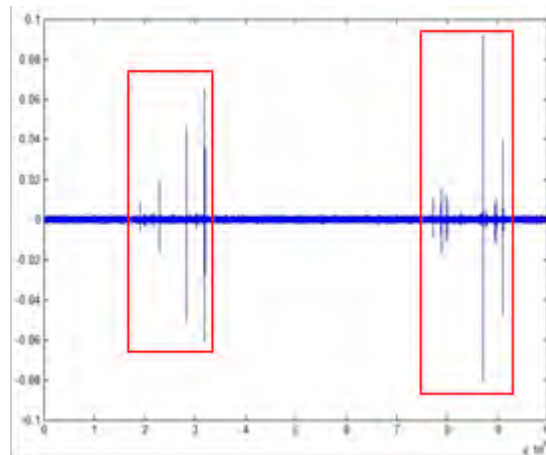


Figure 70 : Segmentation de longueur fixe

Les valeurs retenues afin de réaliser la segmentation sont les suivantes : une fenêtre de décalage $L=30$ (3ms), $K=100$ échantillons (10ms). La construction des segments se base sur le vecteur détecteur D : le point du début du segment est déterminé par la première case égale à 1. A partir de ce point, on considère un segment d'une taille égale à 1,2 s (voir Chapitre II).

3.2.4.3. Extraction de signatures – MFCC

Les segments obtenus dans l'étape précédente sont ensuite divisés en fragments qui se chevauchent. Les paramètres pour la MFCC sont choisis comme suit :

* *Fragmentation et Fenêtrage* : nous avons choisi une taille de fragments égale à 25 ms, la taille du décalage des fragments est égale à 10 ms. La fenêtre Hamming est utilisée pour la réduction de l'effet de bord ;

* *Nombre de filtres M* : MFCC est développée pour le traitement de la parole. Afin de l'adapter ici pour le traitement du signal d'insecte, on recalcule le banc de filtres sur la bande utile [1 kHz, 4 kHz] comme le montre la Figure 71. Plus le nombre de filtres est augmenté, plus la résolution fréquentielle du spectre du signal est meilleur, par conséquent, le temps du calcul augmente. Plusieurs tests ont été effectués sur des fichiers avec des nombres de filtres $M=20$ et $M=26$. Il s'avère que $M=26$ donne un meilleur compromis résultats / temps de calcul.

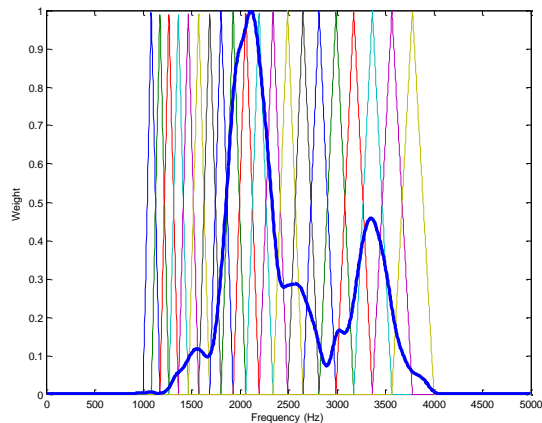


Figure 71 : Calcul l'échelle Mel dans la bande utile

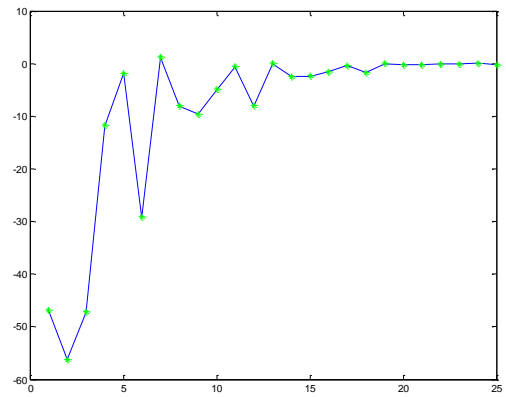


Figure 72 : Les valeurs des 26 coefficients MFCCs

La Figure 72 présente la courbe des 26 coefficients MFCCs qui sont extraits d'un fragment contenant une impulsion simulée. On constate que, à partir du 13e coefficient, la courbe est presque plate. Cela s'explique par la propriété de regroupement de l'énergie de la transformé en cosinus discrète (DCT) : les fortes amplitudes se situent dans les basses fréquences, à l'inverse, les faibles dans les hautes fréquences. Cette propriété amène à la conservation seulement des 12 premiers coefficients (C1 – C13). Ces coefficients représentent donc la signature du bruit généré par les insectes.

La Figure 73 présente un segment contenant deux impulsions d'insecte. On extrait les coefficients MFCC des 3 différents fragments dont deux contenant chacun un pic, que l'on compare les valeurs avec celles extraites d'un troisième fragment qui ne contient aucun pic.

Sur la Figure 74, nous constatons que les allures des courbes des coefficients MFCCs (bleue, verte) sont presque identiques, tandis que la courbe du bruit (courbe rouge) est complètement différente. Pour la classification, on regroupe les coefficients MFCCs de fragments d'insecte dans une seule classe, d'autre part, les coefficients MFCC de frames de bruit sont regroupés dans une seconde classe.

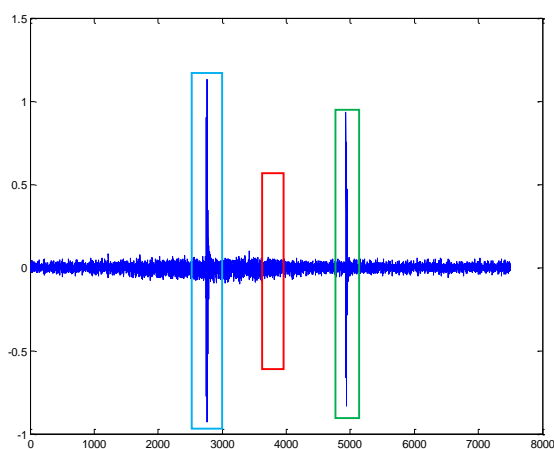


Figure 73 : representation un segment contenant 2 impulsions d'insecte

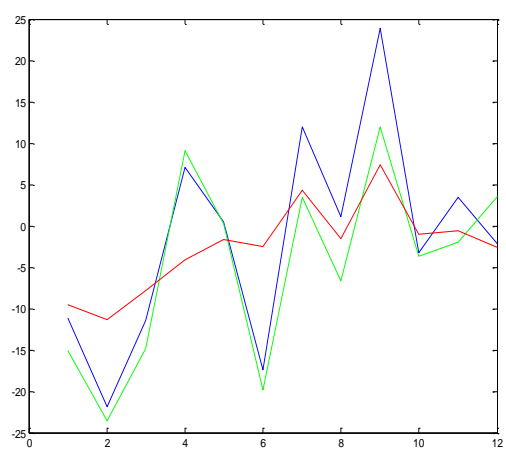


Figure 74 : Tracé des valeurs des 12 coefficients de 3 fragments

3.2.4.4. Résultat de la classification

Afin de tester et évaluer les résultats de la classification, nous avons besoin d'une base d'apprentissage pour effectuer une classification supervisée. Cette base de données peut être construite de la façon suivante :

- On effectue la classification non-supervisée par la méthode GMM sur des données bien choisies afin de regrouper automatiquement les coefficients MFCCs calculés en deux classes (classe d'insecte et classe de bruit).
- Pour la partie d'analyse spectrale par STFT, on sait que les fragments contenant des impulsions d'insectes présentent des raies verticales dans le spectrogramme. À partir de la position de ces raies, on peut identifier l'indice des fragments d'insectes. On utilise ces indices pour vérifier le résultat de regroupement obtenu par la classification non-supervisée, autrement dit on vérifie si les fragments contenant des signaux d'insectes sont affectés correctement dans la bonne classe ou non.
- Après avoir validé la base d'apprentissage les couples coefficients MFCCs et leurs indices de classes, sont utilisés afin de répartir les nouvelles frames dans une de deux classes.

Pour construire la base d'apprentissage, nous avons choisi un enregistrement effectué dans du grain contenant 1 insecte adulte avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Le *clustering* est réalisé afin de regrouper les données dans deux classes : la classe 1 modélise les 12 coefficients MFCCs de la signature d'insecte, la classe 2 modélise les coefficients MFCCs de bruit (Figure 75). Les modèles de ces 2 classes sont utilisés comme base de référence pour la classification supervisée des signaux.

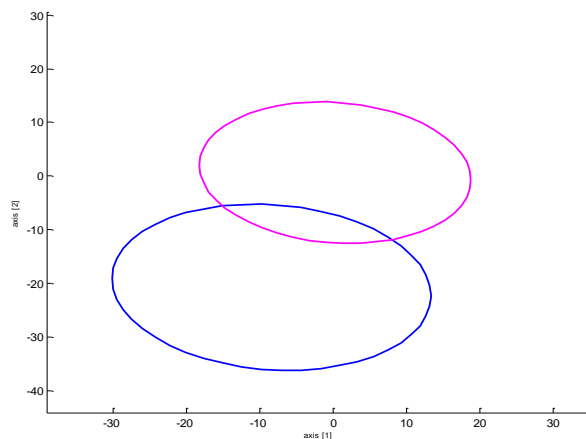


Figure 75 : Résultat de la classification non supervisée

Nous avons effectué le test sur 50 enregistrements qui se composent de :

- 10 enregistrements dans du grain sain (sans insecte) ;
- 10 enregistrements dans du grain contenant un seul insecte ;
- 10 enregistrements dans du grain contenant deux insectes ;
- 10 enregistrements dans du grain contenant trois insectes ;

- 10 enregistrements dans du grain contenant plusieurs insectes (>10).

La Tableau 7 présente les résultats obtenus suite à l'application de notre méthode de détection de présence des insectes sur tous les enregistrements réalisés. Nous rappelons que tous ces enregistrements ont été réalisés dans le caisson SILOTEST 2 donc dans un environnement non bruité.

Grain non infesté	
Nom des fichiers	Nb de fragments détectés
no_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_2time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_3time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_4time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_5time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_6time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_7time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_8time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_9time.mat	0
no_insect_4pz_10k_frq_10time.mat	0
Un insecte	
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	37
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	124
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	16
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	7
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	20
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	42
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	11
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	13
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	18
one_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	14
Deux insectes	
two_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	42
two_insect_4pz_10k_frq_2time.mat	44
two_insect_4pz_10k_frq_3time.mat	49
two_insect_4pz_10k_frq_4time.mat	68
two_insect_4pz_10k_frq_5time.mat	58
two_insect_4pz_10k_frq_6time.mat	94
two_insect_4pz_10k_frq_7time.mat	4
two_insect_4pz_10k_frq_8time.mat	24

two_insect_4pz_10k_frq_9time.mat	22
two_insect_4pz_10k_frq_10time.mat	1
Trois insectes	
three_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	336
three_insect_4pz_10k_frq_2time.mat	12
three_insect_4pz_10k_frq_3time.mat	13
three_insect_4pz_10k_frq_4time.mat	25
three_insect_4pz_10k_frq_5time.mat	24
three_insect_4pz_10k_frq_6time.mat	10
three_insect_4pz_10k_frq_7time.mat	4
three_insect_4pz_10k_frq_8time.mat	11
three_insect_4pz_10k_frq_9time.mat	15
three_insect_4pz_10k_frq_10time.mat	11
Plusieurs insectes >10 insectes	
many_insect_4pz_10k_frq_1time.mat	144
many_insect_4pz_10k_frq_2time.mat	74
many_insect_4pz_10k_frq_3time.mat	128
many_insect_4pz_10k_frq_4time.mat	136
many_insect_4pz_10k_frq_5time.mat	141
many_insect_4pz_10k_frq_6time.mat	18
many_insect_4pz_10k_frq_7time.mat	8
many_insect_4pz_10k_frq_8time.mat	16
many_insect_4pz_10k_frq_9time.mat	24
many_insect_4pz_10k_frq_10time.mat	17

Tableau 7 : Résultat du traitement des fichiers enregistrés

Afin d'évaluer les performances de notre méthode de détection en laboratoire, nous avons calculé la sensibilité ainsi que la spécificité de celle-ci.

Dans une mesure statistique, on peut avoir quatre cas de figures :

- vrai positif : représente le cas où pour un enregistrement effectué dans du grain infesté, le système détecte la présence d'insectes ;
- faux positif : représente le cas où pour un enregistrement effectué dans du grain sain, le système détecte une présence d'insectes ;
- vrai négatif : représente le cas où pour un enregistrement effectué dans du grain sain, le système ne détecte aucune présence d'insectes ;

- faux négatif : représente le cas où pour un enregistrement effectué dans du grain infesté, le système ne détecte aucune présence d'insectes.

A partir de ces définitions, on peut dire que le système développé n'a donné aucun faux résultat négatif après traitement de tous les enregistrements.

Résultats des test

- Pour les 10 enregistrements sans insecte, tous les résultats obtenus sont vrais négatifs (absence d'insectes, pas de détection) ;
- Pour les 40 enregistrements avec insectes, on a pu détecter la présence d'insectes dans tous les enregistrements:

$$\text{Sensibilité} = \frac{\text{Nb de vrais positifs}}{\text{Nb de vrais positifs} + \text{Nb de faux négatifs}} = \frac{40}{40 + 0} = 100\%$$

$$\text{Spécificité} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de vrais négatifs}}{\text{N}^{\circ} \text{ de vrais négatifs} + \text{N}^{\circ} \text{ de faux positifs}} = \frac{10}{10 + 0} = 100\%$$

Suite aux tests réalisés, le système développé affiche une sensibilité de 100 % et une spécificité de 100%.

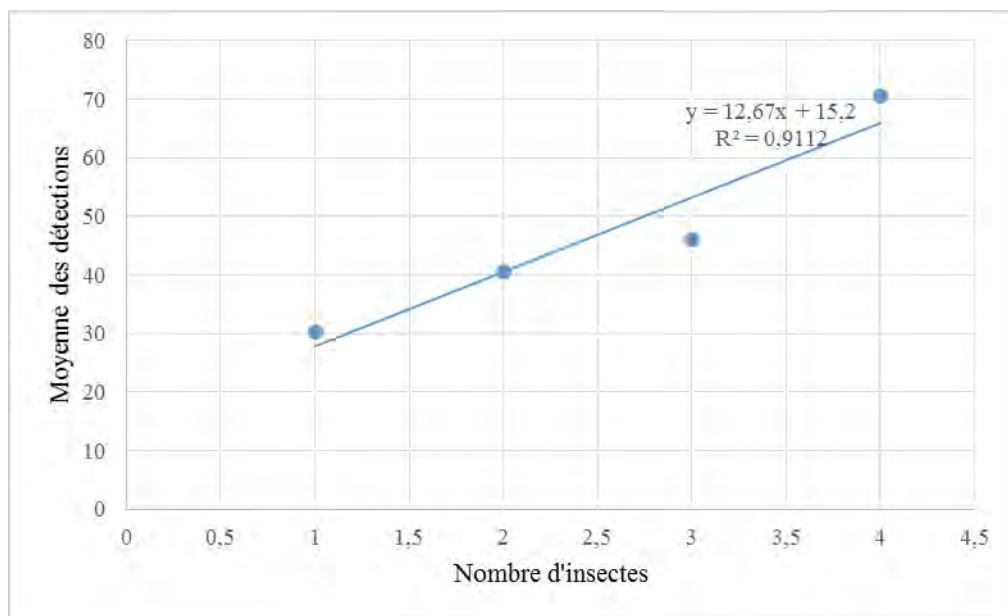


Figure 76 : Corrélation entre le nombre d'insectes et la moyenne des détections

En faisant la moyenne du nombre de *fragments* détectés contenant une signature d'un bruit d'insectes en fonction du degré d'infestation du grain (le nombre d'insectes), nous remarquons qu'il y est une forte corrélation comme le montre la Figure 76.

Nous avons présenté dans cette partie du quatrième chapitre les résultats obtenus en laboratoire sur le module SILOTEST 2. Suite à cette présentation, nous pensons que ce système pourrait donner des

résultats similaires voire meilleurs sur site réel notamment car le problème du bruit extérieur ne se pose pas de la par la propriété isolante du grain.

Nous présenterons dans la dernière partie les résultats de l'expérimentation menée dans les silos du céréalier Arterris à Lavour.

3.3. Analyse comparative des résultats sur les capteurs

La mesure de température est d'une sensibilité faible pour détecter une présence précoce d'insectes. C'est une mesure traditionnelle pour la surveillance des silos qui peut prévenir l'existence de points chauds et des risques explosifs. Nous montrons ici que la température, utilisée dans ses précisions ultimes (0,01 °C) peut aussi servir de détecteur d'insectes d'autant que l'on peut disposer au point de mesure, d'un modèle thermique prédictif de la valeur de la température hors présence des insectes et que l'on peut travailler sur les écarts Théorie/Expérience pour gagner en sensibilité.

La mesure de CO₂ donne une sensibilité de détection théorique de 1 insecte/kg et dans une heure de temps ce chiffre est estimé pour un volume étanché. C'est à notre avis le détecteur potentiellement le plus sensible et la généralisation de son usage dans toute la hauteur du silo doit permettre de réaliser des détections d'insectes extrêmement précoces. C'est aussi un capteur qui, par nature, surveille des volumes de grains très significatifs lié à la diffusion relativement importante du CO₂ dans l'air contenu dans le tas de grain. Au-delà de la détection des insectes, ce capteur est très important pour la détection des autres problèmes liés aux réactions biotiques (respiration de grain excessive, fermentation,...) car contrairement à la température et au son, le gaz de CO₂ se diffuse dans le grain ce qui lui donne un rayon de surveillance plus important que tout autre capteur.

La mesure par sonde acoustique donne une sensibilité de 0,5 insecte/Kg. Sa mise en œuvre nécessite de se prémunir contre les bruits externes et de mettre en œuvre des techniques de filtrage relativement évoluées. C'est une technologie qui peut être sensible avec le handicap de ne mesurer que sur une distance faible de quelques dizaines de centimètres (≈ 20 cm) du point de mesure.

Notre préconisation, du point de vue des capteurs, est :

- **de rester sur une mesure thermique distribuée en exploitant en relation la comparaison à une modélisation thermique du silo et tirant le meilleur parti mieux des performances en sensibilité des capteurs thermiques jusqu'au centième de degré (0,01 °C). Soulignons qu'ils sont miniaturisés et apportent en sus, un suivi de l'humidité indispensable au modèle biologique.**
- **d'associer une mesure de CO₂, qui est extrêmement sensible : elle peut être envisagée sur toute la hauteur du silo pour avoir une détection rapide mais on peut aussi voir cette mesure comme une composante de sécurisation du silo et la placer en fond de silo, en surveillance globale du tas de grain.**

4. L'expérimentation du système complet SILOCARE sur site réel

4.1. Présentation du système installé

L'organisme stockeur Arterris est l'un des grands organismes de la région Midi-Pyrénées. Il dispose de plusieurs silos de stockage dans cette région. Le silo d'Arterris à Lavaur est d'une taille petite, disposant de cellules de stockage de 600 tonnes. Ce site a été jugé le mieux adapté pour une première expérimentation du système SILOCARE par la taille de ses cellules, compatible avec le prototype de SILOTEST, à trois points de mesure dans la hauteur du tas de grains. Un autre avantage de ce choix est que le site n'est équipé que de sondes de thermométrie avec des afficheurs, ne dispose d'aucun système de ventilation, ce qui devrait nous permettre de suivre au mieux l'évolution naturelle de la température du grain en fonction de la température ambiante.

L'objectif de cette expérimentation était multiple :

- Valider le déploiement du système sur site réel.
- Valider le fonctionnement du système en situation d'exploitation.
- Valider la fonction de prévention par le modèle biologique.
- Valider la fonction de détection de présence d'insectes.
- Evaluer les possibilités ultimes des mesures thermiques.

4.2. Déploiement de la sonde SILOTEST 3

SILOTEST 3 conçu de manière modulaire donne davantage prise aux forces qui s'exercent lors du remplissage du silo et surtout lors de la vidange : les forces d'attraction exercée sur la sonde risquent en effet de poser des problèmes de casse de la sonde ou de la toiture portant la sonde. Ces forces ont été mesurées expérimentalement et peuvent atteindre 1000 tonnes, sur les sondes thermiques actuelles et pour des grands silos de plus de 15 mètres. SILOTEST 3 utilise une technologie de raccord des modules proposées par l'atelier de mécanique du laboratoire qui reste dans la gamme de résistance à la traction des sondes thermiques (1000 tonnes) et a pu être déployé selon les procédures habituelles.

Toute installation à effectuer en hauteur dans une cellule de stockage exige l'intervention de personnes spécialisées pour des raisons de sécurité. Arterris a confié la tâche de l'installation de la sonde SILOTEST 3 à l'entreprise **Bûches, Travaux & Co** spécialisée dans les travaux en hauteur. Afin de connecter la sonde SILOTEST 3 avec le PC de contrôle, nous avons utilisé un câble réseau blindé pour qu'il résiste aux éventuelles attaques de rats, puis un branchement sur un switch relié au réseau local du site de Lavaur a été effectué. La Figure 78 présente l'architecture du système installé.



Figure 77 : Installation de la sonde SILOTEST 3

La cellule de stockage a été par la suite remplie avec 500 tonnes de blé afin de limiter la force d'attraction exercée par le tas de grains lors de la vidange. Le blé utilisé pour l'expérimentation était en partie traité par des insecticides.

La sonde installée a été programmée pour qu'elle fonctionne selon un mode passif, c'est le logiciel SILOSOFT installé sur le PC de contrôle qui interroge la sonde, suivant le timing programmé, afin de récupérer les données capteurs.

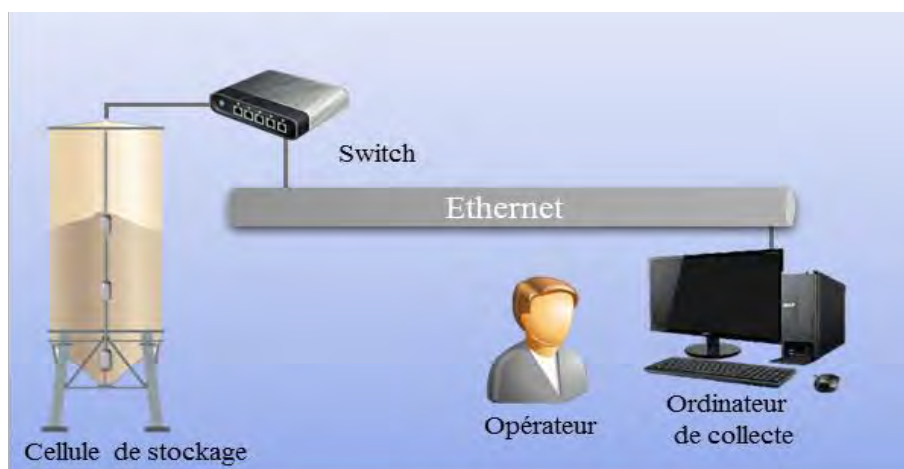


Figure 78 : Architecture réseau du système SILOCARE

Toutes les données issues des capteurs sont enregistrées dans la base de données puis sont traitées et affichées par le logiciel SILOSOFT. La Figure 79 montre un exemple d’affichage de la concentration du CO2 dans le grain.



Figure 79 : Exemple d’affichage de la concentration du CO2 inter granulaire

Le tableau de bord affiche des indicateurs avec un pourcentage caractérisant l’évolution de l’état de l’indicateur. Ce pourcentage est affiché afin que l’opérateur puisse suivre l’évolution des résultats des modèles proposés. Nous avons laissé également le choix aux utilisateurs finaux de fixer les seuils d’alertes afin que l’application soit compatible avec les différents types de céréales stockées ainsi que les exigences du stockeur.

Le logiciel SILOSOFT permet la configuration du délai d’interrogation de la sonde, le paramétrage des modèles ainsi que la gestion de l’affichage et des alarmes.

La Figure 80 présente le panneau de configuration de la première version du logiciel SILOSOFT.

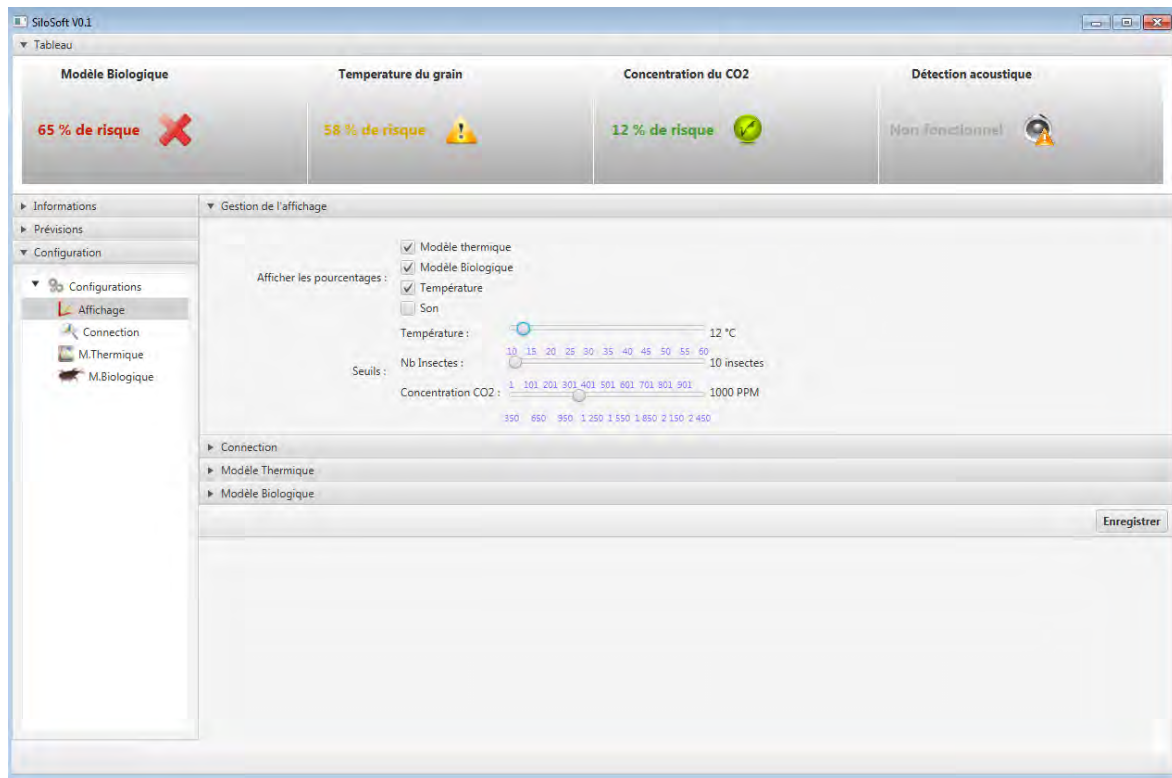


Figure 80 : Interface de configuration du logiciel SILOSOFT

4.3. Résultats de l'expérimentation

Nous avons lancé cette expérimentation dans une des cellules du site de Lavaur le 11 avril 2014. L'installation a été effectuée sans aucun problème noté, les tests de communication entre le PC de contrôle et la sonde étaient également tous positifs. Cette expérimentation a duré jusqu'au 12 juin date à laquelle l'organisme stockeur a pris la décision de vider la cellule dans laquelle se déroulait l'expérimentation pour des raisons économiques. Le système installé n'a signalé aucune infestation ou dysfonctionnement durant cette période. La Figure 81 présente une capture d'écran du logiciel prise le dernier jour de l'expérimentation. Nous remarquons un voyant orange affichée concernant la Température du grain, cela est dû à la configuration du seuil de degré de température de danger. En effet, nous avons convenu avec les opérateurs de distinguer trois niveaux de danger : vert, orange et rouge, qui correspondent respectivement à $< 50\%$, $\leq 50\%$ et $\geq 70\%$ et $< 70\%$ du seuil de danger.

Contrairement aux températures normales saisonnières de cette période de l'année et dans le sud, qui commencent habituellement à grimper à partir du mois de mars, cette année-ci les températures sont restées basses et ce pendant toute la période de l'expérimentation avec une moyenne de $15,5\text{ °C}$ au sein du silo. Cela a même provoqué la chute de la température du grain d'environ $0,5\text{ °C}$ dans la partie supérieure ce qui ne nous a pas permis de valider le modèle thermique. En ce qui concerne les résultats du modèle biologique, chose qui était prévisible pour cause de températures basses, le nombre d'insectes estimé était de 19 insectes par tonne, en partant d'une hypothèse de 1 insecte par tonne, ce qui correspond à une densité de 0,19 insectes par 10 Kg. Cette densité représente une très faible

infestation et ne présente aucun danger sur le grain, d'autant plus que les températures n'ont pas augmentées, car loin du seuil de risque de perte économique qui est de 1 insecte vivant par 5 kg de grain. Le grain utilisé a subi, après vidange de la cellule, les tests de présence d'insectes qui ont donné des résultats négatifs, dans le sens où aucun insecte n'a été trouvé. Ceci est tout à fait normal car il n'est possible de voir moins de 1 insecte par 10 Kg de grains en utilisant des méthodes manuelles (prélèvement + tamisage).

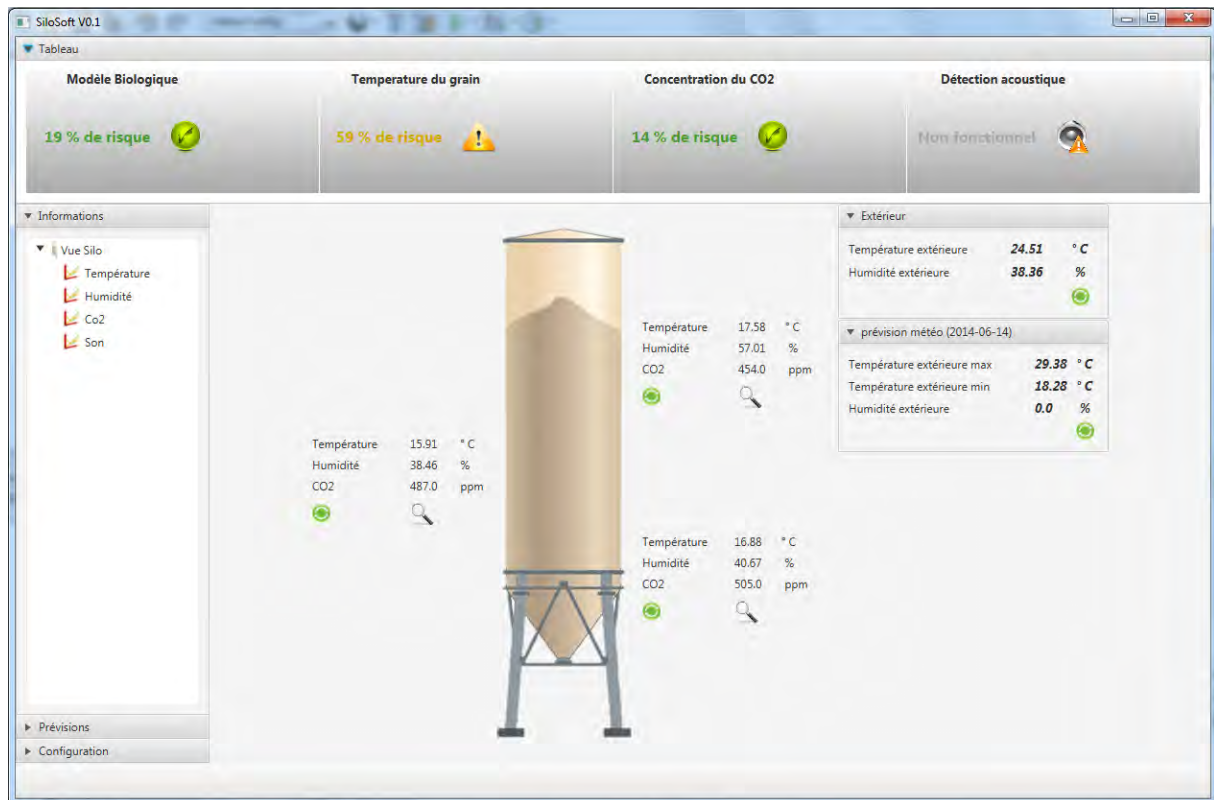


Figure 81 : Interface principale du logiciel SILOSOFT : exemple réel de l'expérimentation de LAVAUR

Au niveau de la concentration du CO2, cette mesure n'a également pas donné d'indication d'anomalie, la mesure est restée plutôt stable autour de 500 ppm.

L'une des craintes qui revenait assez souvent de la part des opérateurs du silo est la résistance mécanique de la sonde pendant la vidange. Cette crainte est bien justifiée car plusieurs incidents se sont produits par le passé dans les silos de l'organisme avec de simples sondes de température. La vidange de la cellule s'est déroulée sans aucun problème malgré les dimensions non négligeables des cylindres portés par la sonde. La sonde ainsi que la structure porteuse ont bien supporté la charge exercée par le grain.

4.4. Insuffisances du système constatées

La difficulté majeure à laquelle nous étions confrontés réside dans la réalisation de tests dans des conditions réelles. En d'autres termes, ce type de système demande des tests de longues durées et dans différentes situations afin de pouvoir juger de son efficacité. Malgré le fait que le système que nous

avons pu installer dans le silo de LAVAU est pleinement fonctionnel, dire s'il est pertinent ou non demanderait une plus longue période d'observation et une analyse poussée des données.

5. Discussion

Nous avons tenté de répondre aux exigences croissantes qui concernent le stockage des grains. Ces exigences peuvent être résumées par la tendance d'augmenter la longévité de conservation en assurant une qualité du grain irréprochable et tout ça, sans avoir « trop » recours aux insecticides. Nous nous sommes donc attachés à mettre en place un système de détection « au plus tôt » (prédiction par modélisation). Nous avons également fait des propositions de positionnements (SILOTEST 1, 2, 3) et de capteurs : température, humidité, CO₂, sonde acoustique. Ces capteurs ont tous leurs intérêts mais, il semble clair que la température et l'humidité sont des éléments fondamentaux de tout système de surveillance et que le CO₂ bien utilisé, c'est-à-dire dans des silos adaptés, est de nature à détecter très rapidement toute infestation ou même toute anomalie mettant à risque la bonne santé du silo. Il peut être envisagé, dans une application rigoureuse, à délivrer un certificat de bonne conservation.

Les expériences de validation sont difficiles à conduire du fait de la nature vivante et aussi des imperfections de notre cahier des charges que nous avons noté dans le texte, lié à ce que nous conduisons deux essais en un : la surveillance et les effets d'attractifs.

Avec cette exploration plutôt fouillée de cette problématique, nous pensons que le concept SILOCARE est bel et bien une solution attractive pour mettre en œuvre une solution de surveillance complète dans les silos :

- des capteurs (T, H, CO₂, Sonde acoustique) répartis dans la hauteur du tas de grain, installés sur des sondes espacées de quelques 6 à 7 mètres les unes des autres, dont on collecte sans fil, les données dans une base de données ;
- une modélisation empirique systématique de la répartition de la température dans le tas de grain, couplée à un modèle biologique pour estimer de manière prédictive les risques d'explosion des infestations. Cette prédiction nécessite une connexion aux prévisions météorologiques et peut être précise sur les premiers 15 jours et significative sur un mois au moins. Ce concept de modélisation biologique de la croissance d'insectes doit être utilisé dans l'esprit d'une pré-alerte nécessitant une surveillance accrue. La modélisation, une fois installée, pourra être améliorée d'année en année, par apprentissage des réalités observées ;
- l'autre élément de sécurisation est l'alarme que doivent donner les capteurs de surveillance en détectant au plus tôt (objectif : un insecte par 5 kilos de grains) la présence des larves et des insectes : il faut là s'appuyer sur le CO₂ et la sonde acoustique. Notre préférence va au CO₂ qui propose une surveillance très sensible et collective, avec un coût raisonnable et une technicité très maîtrisable.

Nous avons, à LAVAU, pu sur un silo en exploitation installer le système SILOCARE au complet pendant deux mois où nous avons pu constater qu'il était fonctionnel mais aucun incident d'infestation n'a pu être observé.

Toutes ces conclusions mériteront d'être approfondies dans une expérimentation beaucoup plus lourde que celle que nous avons conduite. Deux axes complémentaires devraient être mis en œuvre :

- sur mini silo, en corrigeant les imperfections que nous avons signalées, se procurer ou développer des capteurs de CO₂ et de mesures acoustiques plus appropriés ;
- sur les silos en situation réelle d'exploitation, installer SILOCARE à demeure et parfaire les interfaces opérateurs / utilisateurs pour une ergonomie et un appareillage meilleurs.

6. Conclusion

Nous avons dans ce chapitre, sur une première expérimentation en mini silo, étudié les performances des capteurs : cela valide le choix des options que nous avons recommandées mais mérite que de nouveaux efforts soient engagés pour préciser les performances ultimes du capteur CO₂ et de la sonde acoustique.

Notre proposition d'un système complet pour la protection des grains entreposés a été développée et expérimentée sur le silo d'Arterris de LAVAU. Les résultats des premiers tests ont été présentés dans ce dernier chapitre, résultats qui mériteront de nouvelles étapes. Une nouvelle démonstration permettrait de confronter SILOCARE aux situations réelles de préventions, détectations et actions.

SILOCARE, parce qu'il intègre plusieurs méthodes dans la démarche de protection des grains, permettra de réduire les risques en les détectant et les traitant au plus tôt ; L'intégration dans SILOCARE d'une stratégie ECOSILO de traitements dans des volumes de grains limités où on aurait réussi à collecter les insectes serait évidemment une avancée encore plus considérable, sans avoir recours de manière forte et systématique aux produits insecticides.

Le logiciel de conduite SILOSOFT, qui est proposé ici dans sa première version expérimentale devra être confronté aux usages : C'est un outil indispensable pour une gestion meilleure et plus sécurisée des lots de grain.

Prédire l'état du grain et connaître ce qui se passe dans la cellule sont des informations qui peuvent éviter des pertes considérables. A travers les expérimentations conduites, nous avons montré qu'un tel système peut être conçu fonctionnel pour apporter une valeur ajoutée à la vie des organismes stockeurs : sécurisation des grains, réactivité face aux dangers de l'infestation et demain réduction de l'usage des insecticides. Malgré un certain nombre d'insuffisances précédemment décrites. Ces insuffisances peuvent être palliées par de nouvelles expérimentations dans des sites réels et par de nouvelles avancées technologiques, par exemple la miniaturisation des modules développés dans la sonde SILOTEST 3.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La protection post-récolte du grain contre les différents ravageurs, notamment pendant la période de stockage, est un enjeu réel de notre époque, particulièrement lorsque les réserves mondiales en matière de céréales sont insuffisantes pour faire face à l'explosion démographique. Les insectes, par leur faculté à se multiplier très rapidement, sont les premiers ravageurs des denrées entreposées. La méthode actuellement la plus répandue est l'utilisation de produits insecticides chimiques de synthèse dont la dangerosité, impactant tant sur la santé humaine que sur l'environnement, est plus qu'évidente.

Notre ambition dans cette thèse, dans le cadre contractuel ECOSILO, était de proposer une alternative à l'utilisation massive des insecticides dans les silos à grains par la proposition de systèmes et de techniques préventives. Notre proposition formulée dans cette thèse repose sur le concept de « protection intégrée ». Elle s'est concrétisée par la conception et la mise en œuvre d'un « système de surveillance complet » capable de prédire, de surveiller et de détecter au plus tôt la présence d'insectes, ainsi que de déclencher la diffusion des attractifs afin de concentrer la présence d'insectes dans une zone réduite avant leur élimination in-situ par la diffusion contrôlée d'insecticides.

La proposition défendue se présente sous forme d'un réseau de capteurs connectés alimentant une base de données par des valeurs et des indices caractéristiques du système à surveiller en vue de créer, grâce à ces données, un modèle empirique du bon fonctionnement du système. L'idée est alors de se servir de ce modèle comme une référence prédictive dans le but de détecter au plus tôt tout dysfonctionnement éventuel et d'enclencher si nécessaire le processus de rectification. L'objectif général est donc d'explorer **la voie de la supervision** pour renforcer le suivi du comportement de systèmes complexes.

Cette thèse s'inscrit au LAAS-CNRS dans le cadre des travaux de recherches consacrés à la conception et aux prototypes de « **systèmes de suivi et de surveillance** ».

Chaque système à surveiller possède des particularités qu'il convient de prendre en compte. **L'idée originale est ici d'avoir proposé d'utiliser comme** modèle référent un modèle **biologique de croissance des insectes**. Ce modèle est créé sur la base de lois de croissances, conditionnées par la température et l'humidité en tous points du silo. En pratique, ce modèle biologique est couplé à un modèle thermique simulant l'évolution en température du tas de grains. Ces modélisations appliquent des techniques d'apprentissage pour parfaire, pas à pas, le choix des valeurs des paramètres. Le système de surveillance est alors capable de déclencher au plus tôt une alerte, et d'engager le processus d'automatisation.

Ce concept générique a été le cœur de nos développements dans cette thèse où il a été accompagné de travaux indispensables sur les capteurs, la collecte des données et sur les algorithmes de traitements et de commandes. A l'issue de ces travaux d'accompagnement, nous avons conçu et développé trois fonctions multi-capteurs :

- SILOTEST 2 pour la détection rapide d'insectes à l'arrivée et avant l'ensilage du grain ;
- SILOTEST 1 pour la surveillance du grain dans des petites cellules de stockage ou pour la surveillance de la partie haute des cellules les plus grandes ;
- SILOTEST 3 pour la surveillance du tas de grains dans toute sa hauteur.

C'est sur ces bases technologiques que nous avons proposé le système « complet » SILOCARE de surveillance des silos.

Les résultats de nos travaux sont détaillés en quatre chapitres :

La surveillance des silos de grain de céréales a été et reste un enjeu très important que nous rappelions dans le Chapitre I. En France, plus de 60 millions de tonnes de céréales sont produites chaque année dont plus de 45 % destinées à l'exportation. Ces récoltes nécessitent forcément plusieurs étapes de stockage avant d'être acheminées à destination, avec pour conséquence des pertes qui atteignent parfois 10% des récoltes. L'enjeu de la surveillance est donc de garantir une meilleure qualité de stockage assurant la minimisation des pertes dans un premier temps, et une qualité sanitaire du grain dans un second temps.

Concernant la qualité, un objectif majeur était de réduire et éliminer l'usage des pesticides. C'est cette perspective qui a motivé le lancement, en 2011, du programme ECOSILO qui a associé les Coopératives avec des spécialistes technologues de la Biologie et des Systèmes Intelligents, sous la conduite de l'entreprise AB7 innovation. La tâche de notre Laboratoire était de conduire le volet de mesures et système de surveillance, sur un objectif global de réduction de l'usage des insecticides en utilisant des effets attractifs pour localiser les traitements insecticides au bon endroit et au bon moment. Dans la littérature, on trouve des travaux surtout consacrés à la détection de la présence d'insectes. Plusieurs techniques de détection et de traitement sont décrites dans le premier chapitre. **Nous avons conclu en privilégiant l'idée d'une intégration multi-capteurs dans les fonctions d'anticipation et de détection des infestations : la thermique, l'humidité, le son et le CO2.**

Notre objectif focal a été de proposer un système « complet » de surveillance. Cela suppose de collecter toutes les informations utiles et d'imaginer une procédure de mise en alerte au plus tôt. Nous avons donc opté pour que cette procédure soit « prédictive », qu'elle anticipe la date de déclenchement d'une alarme. Nous avons alors présenté l'idée d'utiliser un modèle référent biologique, de le coupler à un modèle thermique du silo et, en nous appuyant sur les données de la Météo, de prédire la date probable des infestations.

Le Chapitre II a été consacré à la conception des fonctions retenues : la température est un capteur indispensable dans la surveillance de silos dans la mesure où il y a des risques de « points chauds » et même d'explosions. Afin de rendre son utilisation en tant que capteur de présence des insectes ou plus généralement d'une anomalie plus attractive, **nous avons proposé de coupler cette mesure avec une modélisation thermique du silo, de manière à pouvoir travailler en différentiel entre mesure prédite et mesure courante.**

Nous avons aussi examiné d'autres fonctions qui peuvent amener davantage de sensibilité dans la détection de la présence d'insecte. **La détection par les émissions de CO₂, que nous recommandons** pour sa sensibilité et pour la perspective de pouvoir témoigner du bon fonctionnement tout au long du stockage, ainsi que les méthodes d'extraction de signatures à partir des données acoustiques ont été particulièrement développées.

Une part importante de ce chapitre porte sur le couplage entre la modélisation thermique du point de mesure et la modélisation biologique pour pouvoir prédire la zone de risque d'infestation grave et la date probable de l'infestation.

Le Chapitre III présente les technologies mises en œuvre. Cette mise en œuvre est organisée en présentation de produits possibles, suite à nos travaux et la description des technologies retenues ;

- SILOTEST 1 sur la surveillance en haut de silo ;
- SILOTEST 2 sur la surveillance à l'entrée du silo ;
- SILOTEST 3 sur la surveillance du silo dans toute la hauteur.
- Le système complet SILOCARE qui dispose de son logiciel SILOSOFT doté d'une interface opérateurs simplifiée.

Ce sont des technologies conventionnelles de l'électronique et de l'informatique que nous pensons potentiellement valorisables.

Le 0 a été consacré à la présentation des résultats expérimentaux. Les expérimentations ont été menées sur plusieurs volets. Une première expérience réalisée conjointement avec AB7 dont les résultats étaient difficilement interprétables pour les raisons évoquées. Malgré cette difficulté, cette expérience nous a permis de conforter notre choix d'intégrer le capteur de CO₂ dans notre sonde multi-capteurs car ce paramètre reste attractif dans la mesure où le CO₂ se propage de manière remarquable et permet de détecter un incident même loin du point de mesure contrairement aux autres capteurs. Une deuxième expérience consacrée à la détection acoustique de la présence d'insectes a également été menée. Nous retenons que la détection acoustique reste le moyen le plus rapide pour la détection de la présence d'insectes en s'appuyant sur les avancées en termes de traitement de signal. La méthode d'extraction de signatures MFCC est une technique puissante et d'ailleurs utilisée dans différents systèmes de reconnaissance vocale. L'idée de ce choix réside dans le fait que les premiers systèmes de détection acoustique des insectes se basaient sur l'ouïe. C'est ce qui nous a poussé à explorer cette

méthode. Une troisième expérimentation réalisée dans un vrai silo de stockage nous a permis de valider le système SILOCARE.

Ce système, grâce à ses différents modules, est capable de faciliter le travail des organismes stockeurs en leur donnant accès à tous les indicateurs de bonnes conditions de stockage ou, en cas d'un éventuel dysfonctionnement, de les alerter le plus tôt possible afin qu'ils prennent les bonnes décisions et ainsi protéger les stocks de toute perte éventuelle.

Globalement, nos résultats confortent la pertinence du concept de système de surveillance complet basé sur un modèle biologique référent de la croissance des insectes en fonction de la distribution et de l'évolution de la température du silo en tous points surveillés. Tous les éléments de cette proposition ont été testés et validés dans leurs principes. Il faut toutefois reconnaître que la validation opérationnelle mériterait une étape nouvelle d'expérimentations sur quelques silos observés sur une campagne complète de la récolte jusqu'à la commercialisation. De notre point de vue, tous les éléments d'une expérimentation sont en place afin qu'une nouvelle génération de systèmes de protection des céréales puisse voir le jour.

Soulignons les autres points d'innovations qui pourraient être valorisés industriellement :

- L'intégration multi-capteurs dans SILOTEST ;
- L'idée de prélèvement à l'entrée dans une chambre sourde ;
- Les algorithmes de détection acoustique ;
- Le détecteur CO₂ placé en fond de silo ;
- L'automatisation de la détection et la proposition d'un système ergonomique pour le suivi des conditions du stockage ;
- L'information du personnel dans le cas où les paramètres surveillés dépassent les seuils préalablement fixés.

Quelles perspectives à court terme ?

Sur le plan fondamental nous voyons bien au terme de ce travail qu'exceptés les capteurs, qui peuvent toujours être améliorés, les technologies de la surveillance sont aujourd'hui disponibles. Nous pensons qu'il revient aux industriels d'investir pour sécuriser les stocks tout en respectant l'Homme et l'environnement. Les possibilités permises par les « objets connectés » autorisent d'envisager des systèmes de surveillance intelligents déportés au plus près de la mesure à effectuer et ce dans tous les secteurs de développements. Pour la recherche, l'enjeu est considérable dans le volet de l'aide à la décision. Il est prévisible que la décision technique, ici de commander les insecticides, va progressivement s'enrichir de données contextuelles qui permettront encore de réduire les risques et d'optimiser les décisions.

Sur le plan industriel, le LAAS-CNRS et AB7 sont en contact régulier pour tenter de valoriser tout ou partie des résultats obtenus en commun. Une première idée était de tenter de co-déposer un Brevet sur le système complet de surveillance SILOCARE, et de construire un consortium autour d'une nouvelle étape d'essais et de validation en situation réelle comme nous le proposons dans cette thèse. Une autre idée est de valoriser cette technologie brique par brique :

- SILOTEST 1 nous paraît parfaitement adapté à la surveillance des petits silos ;
- SILOTEST 2 peut être un candidat pour les contrôles qualité au moment de l'ensilage ;
- SILOTEST 3 mérite une expérimentation plus importante et un effort de miniaturisation des sondes qui seraient intégrées dans toute la hauteur du silo, qui est sûrement un bon chemin à explorer pour les grands silos. Il y a le volet CO₂, testé avec l'appui de l'entreprise AB7, pour lequel il a été démontré expérimentalement que la concentration en CO₂ est proportionnelle à la concentration d'insectes. C'est, pour nous, le détecteur qui nous semble le plus sensible pour une surveillance de longue durée. A cela s'ajoute le volet logiciel des surveillances prédictives intégrant la modélisation par apprentissage du point de mesure thermique, permettant la prédiction de l'évolution de la température du point de mesure dans le grain, en s'appuyant sur les données météo et les données météo historiques. Cette évolution de la température serait couplée à un modèle biologique pour anticiper la période "danger" ou d'infestation rapide du grain. Notre proposition multiplateforme dans sa première version est actuellement fonctionnelle, mais elle mérite tout de même une poursuite de son développement dans le but d'y intégrer un couplage de bonnes règles et de bonnes décisions à prendre pour arriver à un véritable système expert complet.

Tout est en place pour concevoir des dispositifs opérationnels de mesure en continu pour surveiller et garantir « la bonne santé » des grains.

BIBLIOGRAPHIE

-
- [1] LAAS-CNRS, « Surveillance de la santé des hommes et des structures », févr-2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.laas.fr/public/fr/syst%C3%A8mes-pour-la-surveillance-de-la-sant%C3%A9-et-des-structures>. [Consulté le: 21-janv-2016].
 - [2] S. BONHOMME, « Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent », Thèse, INSA de Toulouse, LAAS-CNRS, Toulouse, 2008.
 - [3] W. Bourennane, « Étude et conception d'un système de télésurveillance et de détection de situations critiques par suivi actimétrique des personnes à risques en milieu indoor et outdoor », Theses, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, LAAS-CNRS, Toulouse, 2013.
 - [4] Y. CHARLON, « Conception de dispositifs électroniques portés pour le suivi de l'état de santé des personnes âgées », Thèse, Université Toulouse Paul Sabatier - Toulouse III, LAAS-CNRS, Toulouse, 2014.
 - [5] D. Proctor, *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries*. Food & Agriculture Org., 1994.
 - [6] P. Gerland, A. E. Raftery, H. Ševčíková, N. Li, D. Gu, T. Spoorenberg, L. Alkema, B. K. Fosdick, J. Chunn, N. Lalic, et others, « World population stabilization unlikely this century », *Science*, vol. 346, n° 6206, p. 234–237, 2014.
 - [7] H.-W. Dehne et F. Schönbeck, « {CHAPTER} 2 - Crop protection – past and present », in *Crop Production and Crop Protection*, E.-C. O.-W. D. S. WEBER, Éd. Amsterdam: Elsevier, 1999, p. 45 - 71.
 - [8] E.-C. Oerke, « Crop losses to pests », *J. Agric. Sci.*, vol. 144, n° 01, p. 31–43, 2006.
 - [9] I. G. J. P. M. C. R. R. Jacques Huignard, J. Huignard, I. A. Glitho, J. P. Monge, et C. Regnault-Roger, *Insectes ravageurs des graines de légumineuses: Biologie des Bruchinae et lutte raisonnée en Afrique*. Quae éditions, 2011.
 - [10] USCF, *Bien conserver le grain*. 2015.
 - [11] « Plant Production and Protection Division: Integrated Pest Management ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/ipm/en/>. [Consulté le: 21-déc-2015].
 - [12] P. Ryckewaert et F. Fabre, « Lutte intégrée contre les ravageurs des cultures maraîchères à la Réunion », in *Fifth Annual Meeting of Agricultural Scientists*, 2002, p. 99.
 - [13] D. Mariau, *Lutte intégrée contre les ravageurs des cultures pérennes tropicales*. Editions Quae, 1996.
 - [14] H. Boukabache, « Etude et développement d'un noeud piézoélectrique intégré dans un micro-système reconfigurable : applications à la surveillance », Thèse, INSA de Toulouse, LAAS-CNRS, Toulouse, 2013.
 - [15] J.-P. Charvet, « CÉRÉALES », 2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/cereales/>. [Consulté le: 12-déc-2014].

- [16] P. J. Richerson, R. Boyd, et R. L. Bettinger, « The Origins of Agriculture As a Natural Experiment in Cultural Evolution », *Davis CA Univ. Of*, 1999.
- [17] C. A. Reed, *Origins of Agriculture*. De Gruyter, 1977.
- [18] G. Wackermann, « François Sigaut, Les réserves de grains à long terme. Techniques de conservation et fonctions sociales dans l'histoire. », *Études Rural.*, vol. 76, n° 1, p. 148–148, 1979.
- [19] D. García, « Les structures de conservation des céréales en Méditerranée Nord-occidentale au premier millénaire avant J.-C.: innovations techniques et rôle économique », *Trav. Cent. Camille Jullian*, p. 88–95, 1997.
- [20] P. Céréales, « Les céréales dans le monde, en Europe et en France », 2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.passioncereales.fr/dossier-thematique/les-c%C3%A9r%C3%A9ales-dans-le-monde-en-europe-et-en-france>. [Consulté le: 12-déc-2014].
- [21] FAO, « Situation alimentaire mondiale », 2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr/>. [Consulté le: 12-déc-2014].
- [22] FAO, « Food Outlook (BIENNIAL REPORT ON GLOBAL FOOD MARKETS). », 2014.
- [23] insee, « Production céréalière en 2013 : comparaisons régionales », 2014. [En ligne]. Disponible sur: http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=99&ref_id=t_3501R. [Consulté le: 12-déc-2014].
- [24] P. Céréales, « Des chiffres et des céréales L'essentiel de la filière », 2014.
- [25] J. Gwinner, R. Harnisch, et O. Mück, *Manuel sur la manutention et la conservation des grains après récolte*. 1991.
- [26] INERIS, « Les accidents dans les silos de matières végétales », 2008.
- [27] A. Janes, J. Chaineaux, et others, « Explosion de poussières dans les lieux de travail: recensement et analyse—An Analysis of Dust Explosions in Workplaces », *Cah. Notes Doc.-Hygiène Sécurité Trav.*, n° 220, p. 3–11, 2010.
- [28] J. officiels, *Guide des bonnes pratiques d'hygiène de la distribution de produits alimentaires: par les organismes*. La Documentation Française, 2011.
- [29] L. F. J. Maherou S. Norest, « LES MÉTAUX LOURDS, QUELS RISQUES POUR LA SANTÉ ? », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.asef-asso.fr/problematiques-emergentes/nos-syntheses/1535-les-metaux-lourds-quels-risques-pour-la-sante-la-synthese-de-l-asef>. [Consulté le: 08-janv-2015].
- [30] A. Aldrick, D. Schrenk, et others, « Chemical contamination of cereals. », *Chem. Contam. Residues Food*, p. 421–446, 2012.
- [31] J. Jurewicz et W. Hanke, « Prenatal and childhood exposure to pesticides and neurobehavioral development: review of epidemiological studies », *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*, vol. 21, n° 2, p. 121–132, 2008.
- [32] J. Gwinner, R. Harnisch, et O. Mück, *Manuel sur la manutention et la conservation des grains après récolte*. GTZ, 1996.

- [33] C. König, « Les ravageurs, menace pour nos céréales », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.futura-sciences.com/magazines/nature/infos/dossiers/d/botanique-ravageursmenace-nos-cereales-1658/>. [Consulté le: 08-janv-2015].
- [34] S. Chulze, « Strategies to reduce mycotoxin levels in maize during storage: a review », *Food Addit. Contam.*, vol. 27, n° 5, p. 651–657, 2010.
- [35] A. Delobel et M. Tran, *Les coléoptères des denrées alimentaires entreposées dans les régions chaudes*, vol. 32. IRD Editions, 1993.
- [36] P. Feillet, *Le grain de blé: composition et utilisation*. Inst. National de la Recherche Agronomique, 2000.
- [37] J. Cruz, F. Troude, D. Griffon, et J. Hebert, *Conservation des grains en régions chaudes*, 2.ed éd. Paris, France, Ministère de la Coopération et du Développement: F. PAILLART ABBEVILLE, 1988.
- [38] B. Subramanyam et D. Hagstrum, « Predicting development times of six stored-product moth species (Lepidoptera: Pyralidae) in relation to temperature, relative humidity, and diet », *Eur. J. Entomol.*, vol. 90, p. 51–51, 1993.
- [39] K. Bekon et F. Fleurat Lessard, « Evolution des pertes en matiere seche des grains dues a un ravageur secondaire: *Tribolium castaneum* (Herbst), coleoptere Tenebrionidae, lors de la conservation des cereales. », 1989.
- [40] I. T. des C. et des F. (Paris), *Stockage et conservation des grains à la ferme: guide pratique*. ITCF, 1990.
- [41] A. Camara, « Lutte contre *Sitophilus oryzae* L.(Coleoptera: Curculionidae) et *Tribolium castaneum* Herbst (Coleoptera: Tenebrionidae) dans les stocks de riz par la technique d'étuvage traditionnelle pratiquée en Basse-Guinée et l'utilisation des huiles essentielles végétales », 2009.
- [42] B. Subramanyam, *Integrated Management of Insects in Stored Products*. Taylor & Francis, 1995.
- [43] F. Fleurat-Lessard, J. le Torc'h, et P. Boivin, « The development of *Sitophilus granarius* and *Oryzaephilus surinamensis* on malting barley and the implications for the quality of malt », *Colloq. INRA*, p. 101–119, 2005.
- [44] M. A. Zaman et B. K. Bala, « Thin layer solar drying of rough rice », *Sol. Energy*, vol. 42, n° 2, p. 167 - 171, 1989.
- [45] A. Sharma, C. R. Chen, et N. V. Lan, « Solar-energy drying systems: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 6-7, p. 1185 - 1210, 2009.
- [46] G. C. Mrema, L. O. Gumbe, H. J. Chepete, et J. O. Agullo, *Rural structures in the tropics: design and development*. FAO, 2011.
- [47] D. B. Brooker, F. W. Bakker-Arkema, et C. W. Hall, *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer, 1992.
- [48] P. Narayanasamy, S. Mohan, et J. Awaknavar, *Pest management in store grains*. New Delhi, India: Satish Serial Pub, 2009.

- [49] K. Vick, R. Mankin, R. Cogburn, M. Mullen, J. Throne, V. Wright, et L. Cline, « Review of pheromone-baited sticky traps for detection of stored-product insects », *J. Kans. Entomol. Soc.*, p. 526–532, 1990.
- [50] S. Loschiavo et J. Atkinson, « An improved trap to detect beetles (Coleoptera) in stored grain », *Can. Entomol.*, vol. 105, n° 03, p. 437–440, 1973.
- [51] D. Shuman, J. Coffelt, et D. Weaver, « A computer-based electronic fall-through probe insect counter for monitoring infestation in stored products », *Trans. ASAE*, vol. 39, n° 5, p. 1773–1780, 1996.
- [52] N. White, R. Arbogast, P. Fields, R. Hillmann, S. Loschiavo, B. Subramanyam, J. Throne, et V. Wright, « The development and use of pitfall and probe traps for capturing insects in stored grain », *J. Kans. Entomol. Soc.*, p. 506–525, 1990.
- [53] N. D. G. White et S. R. Loschiavo, « Effects of localized regions of high moisture grain on efficiency of insect traps capturing adult *Tribolium castaneum* and *Cryptolestes ferrugineus* in stored wheat », *Tribolium Inf. Bull.*, p. 97–100, 1988.
- [54] C. canadienne des grains, « Surveillance du grain entreposé à des fins de prévention des infestations par les insectes ravageurs », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.grainscanada.gc.ca/storage-entrepouse/monitor-prevent-fra.htm>. [Consulté le: 26-févr-2015].
- [55] J. Minkevich, C. Demianyk, N. White, D. Jayas, et B. Timlick, « A rapid method to detect *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Cucujidae) larvae in stored grain », *Can. J. Plant Sci.*, vol. 82, n° 3, p. 591–597, 2002.
- [56] S. Neethirajan, C. Karunakaran, D. S. Jayas, et N. D. G. White, « Detection techniques for stored-product insects in grain », *Food Control*, vol. 18, n° 2, p. 157–162, févr. 2007.
- [57] B. Subramanyam et D. W. Hagstrum, *Alternatives to Pesticides in Stored-Product IPM*. Springer US, 2012.
- [58] T. F. Ghaly, « Aeration trial of farm-stored wheat for the control of insect infestation and quality loss », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 20, n° 3, p. 125 - 131, 1984.
- [59] J. Lasseran et F. Fleurat-Lessard, « Aeration of grain with ambient or artificially cooled air: a technique to control weevils in temperate climates », *Proceedings 5th Int. Work. Conf. Stored-Prod. Prot.*, vol. 2, p. 1221–1231, 1991.
- [60] C. Vincent, G. Hallman, B. Panneton, et F. Fleurat-Lessard, « Management of Agricultural Insects with Physical Control Methods* », *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 48, n° 1, p. 261–281, 2003.
- [61] P. G. Fields, « The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 28, n° 2, p. 89 - 118, 1992.
- [62] S. Beckett, P. Fields, et B. Subramanyam, « Disinfestation of stored products and associated structures using heat », *CAB Int.*, p. 182–237, 2007.
- [63] G. Thorpe, « The thermodynamic performance of a continuous-flow fluidized bed grain disinfestor and drier », *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 37, n° 3, p. 27–41, 1987.

- [64] S. Wang, M. Monzon, J. A. Johnson, E. J. Mitcham, et J. Tang, « Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts: I: Heating uniformity and energy efficiency », *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 45, n° 2, p. 240 - 246, 2007.
- [65] R. A. Molins, *Food Irradiation: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, 2001.
- [66] J. E. Rechcigl et N. A. Rechcigl, *Insect pest management: techniques for environmental protection*. CRC Press, 1999.
- [67] P. A. Follett, K. Snook, A. Janson, B. Antonio, A. Haruki, M. Okamura, et J. Bisel, « Irradiation quarantine treatment for control of *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) in rice », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 52, n° 0, p. 63 - 67, 2013.
- [68] A. Hosseinzadeh, N. Shayesteh, H. Zolfaghari, M. Babaei, H. Zarehshahi, H. Mostafavi, et H. Fatollahi, « Gamma radiation sensitivity of different stages of saw-toothed grain beetle *Oryzaephilus surinamensis* L.(Coleoptera: Silvanidae) », *J. Plant Prot. Res.*, vol. 50, n° 3, p. 250-255, 2010.
- [69] M. A. Mullen, « Infrasound retards development of *Tribolium castaneum* and *T. confusum* », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 11, n° 2, p. 111 - 113, 1975.
- [70] F. J. Sala, J. Burgos, S. Condón, P. Lopez, et J. Raso, « Effect of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes », in *New Methods of Food Preservation*, G. W. Gould, Éd. Springer US, 1995, p. 176-204.
- [71] D. S. Jayas, N. D. G. White, et W. E. Muir, *Stored-Grain Ecosystems*. Taylor & Francis, 1994.
- [72] F. Sigaut, « Significance of Underground Storage in Traditional Systems of Grain Production », in *Controlled Atmosphere Storage of Grains*, vol. 1, J. SHEJBAL, Éd. Elsevier, 1980, p. 3 - 14.
- [73] S. Bailey, « Air-tight storage of grain; its effects on insect pests. II. *Calandra oryzae* (small strain) », *Crop Pasture Sci.*, vol. 7, n° 1, p. 7-19, 1956.
- [74] F. Fleurat-Lessard, « Effect of modified atmospheres on insects and mites infesting stored products », *Food Preserv. Modif. Atmospheres*, p. 21-38, 1990.
- [75] C. Adler, H.-G. Corinth, et C. Reichmuth, « Modified Atmospheres », in *Alternatives to Pesticides in Stored-Product IPM*, B. Subramanyam et D. Hagstrum, Éd. Springer US, 2000, p. 105-146.
- [76] P. C. BANKS H. J. .. & ANNIS, « Suggested procedures for controlled atmosphere 1977 storage of dry grain », *Canberra Commonw. Sci. Ind. Res. Organ. Div. Entomol.*, n° 13, p. 23, 1977.
- [77] C. L. Storey, « Exothermic inert-atmosphere generators for control of insects in stored wheat », *J. Econ. Entomol.*, vol. 66, n° 2, p. 511-514, 1973.
- [78] E. J. Bond, *Manual of Fumigation for Insect Control: FAO Plant Production and Protection Paper*. FAO, 1984.
- [79] E. G. Jay, « Suggested conditions and procedures for using carbon dioxide to control insects in grain storage facilities », *Agric. Res. Serv. ARS 51-46*, p. 4, 1971.
- [80] H. J. BANKS, « Recent advances in the use of modified atmospheres for 1979 stored product pest control », *Proc 2nd Int Work. Conf. Stored-Prod. Entomol. Ib. Niger.*, p. 198-217, 1978.

- [81] P. Maris, « Les méthodes de désinfection des surfaces par voie aérienne (DSVA) au peroxyde d'hydrogène sont-elles des alternatives au formaldéhyde? », *Euroréférence*, n° 6, p. 19–23, 2011.
- [82] J. FOURNIER, *Pesticides d'aujourd'hui: problèmes et diversification*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [83] P. De Bach et others, « Biological control of insect pests and weeds. », *Biol. Control Insect Pests Weeds*, 1964.
- [84] T. S. Van Driesche Roy, Bellows Jr., *Biological Control*. Springer US, 1996.
- [85] J. E. Rechcigl et N. A. Rechcigl, *Biological and biotechnological control of insect pests*. CRC Press, 2010.
- [86] P. W. Flinn et D. W. Hagstrum, « Augmentative releases of parasitoid wasps in stored wheat reduces insect fragments in flour », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 37, n° 2, p. 179–186, 2001.
- [87] Olgaly Ramos-Rodríguez, James F. Campbell, et Sonny B. Ramaswamy, « Efficacy of the entomopathogenic nematode *Steinernema riobrave* against the stored-product insect pests *Tribolium castaneum* and *Plodia interpunctella* », *Biol. Control*, vol. 40, n° 1, p. 15 - 21, 2007.
- [88] F. Smith Ray et H. Reynolds, *Principles, definitions and scope of integrated pest control*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1966.
- [89] B. Barrier-Guillot, S. Dauguet, P. Ducom, M. Leblanc, K. Crépon, E. Frérot, E. Losser, A. Bonnery, Y. Ciesla, et F. Fleurat-Lessard, « Economie et innovation en protection raisonnée des céréales contre l'infestation par les insectes au stockage ».
- [90] Francis Fleurat-Lessard, « Monitoring insect pest populations in grain storage: the European context », *Stewart Postharvest Rev.*, vol. 7, n° 3, p. 1-8, déc. 2011.
- [91] F. Fleurat-Lessard et A. Andrieu, « Development of a rapid method to determine insect infestation in grain bins with electro-acoustic devices », *Proceedings 4th International Working Conference on Stored Product Protection*, Tel AVIv, Israel, p. 643, 1986.
- [92] D. Shuman, D. Weaver, et R. Mankin, « Quantifying larval infestation with an acoustical sensor array and cluster analysis of cross-correlation outputs », *Appl. Acoust.*, vol. 50, n° 4, p. 279–296, 1997.
- [93] F.Fleurat-Lessard*, A.-I. Andrieu, et D.R. Wilkin, « New trends in stored-grain infestation detection inside storage bins for permanent infestation risk monitoring », *Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-product Protection*, p. 397–402, 1994.
- [94] F. Fleurat-Lessard, B. Tomasini, L. Kostine, et B. Fuzeau, « Acoustic detection and automatic identification of insect stages activity in grain bulks by noise spectra processing through classification algorithms », in *Proc. 9th International Working Conference on Stored Product Protection*, 2006, p. 476–486.
- [95] D. W. Hagstrum, P. W. Flinn, et D. Shuman, « Automated monitoring using acoustical sensors for insects in farm-stored wheat », *J. Econ. Entomol.*, vol. 89, n° 1, p. 211–217, 1996.
- [96] S. Technologies, « EWD : Détection d'insectes dans les produits stockés en vrac », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.systelia.fr/nos-produits/>. [Consulté le: 26-févr-2015].
- [97] M. Milner, M. R. Lee, et R. Katz, « Radiography applied to grain and seeds », 1952.

- [98] C. Karunakaran, D. Jayas, N. White, et others, « Soft X-ray inspection of wheat kernels infested by *Sitophilus oryzae*. », *Trans. ASAE*, vol. 46, n° 3, p. 739–745, 2003.
- [99] R. . Semple, P. . Hicks, J. . Lozare, et A. Castermans, « Towards integrated commodity and pest management in grain storage », *Proc. Integr. Pest Manag. Strateg. Grain Storage Syst. Conf.*, 1988.
- [100] Xingwei H, Xianchang T, et Jianchun W, « The comparison of five determination methods for hidden insect infestation. », *Proceedings of the 7th International Working Conference on Stored-product Protection*, Beijing (P.R. China), p. 1537–1540, 1999.
- [101] S. Neethirajan, M. Freund, D. Jayas, C. Shafai, D. Thomson, et N. White, « Development of carbon dioxide CO₂ sensor for grain quality monitoring », *Biosyst. Eng.*, vol. 106, n° 4, p. 395–404, 2010.
- [102] S. S. Kim, M.-R. Rhyu, J. M. Kim, et S.-H. Lee, « Authentication of rice using near-infrared reflectance spectroscopy », *Cereal Chem.*, vol. 80, n° 3, p. 346–349, 2003.
- [103] F. E. Dowell, J. Throne, D. Wang, et J. Baker, « Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy », *J. Econ. Entomol.*, vol. 92, n° 1, p. 165–169, 1999.
- [104] T. C. Pearson, D. L. Brabec, et C. R. Schwartz, « Automated detection of internal insect infestations in whole wheat kernels using a Perten SKCS 4100 », *Appl. Eng. Agric.*, vol. 19, n° 6, p. 727–736, 2003.
- [105] D. Shuman et N. D. EPSKY, « Commercialization of the Electronic Grain Probe Insect Counter », in *Proceeding of an International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*, Fresno, CA, 2001, vol. 29, p. 665–677.
- [106] L. E. Collins et J. Chambers, « The I-SPy Insect Indicator: an effective trap for the detection of insect pests in empty stores and on flat surfaces in the cereal and food trades », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 39, n° 3, p. 277 - 292, 2003.
- [107] T. W. Phillips, P. M. Cogan, et H. Y. Fadamiro, « Pheromones », in *Alternatives to Pesticides in Stored-product IPM*, Springer, 2000, p. 273–302.
- [108] K. Nualvatna, N. Makathan, C. Chavapradit, K. Kitkuandee, J. Uraichuan, P. Credland, D. Armitage, C. Bell, P. Cogan, E. Highley, et others, « The use of light traps for attracting stored-product insects in a rice mill and paddy seed stores. », in *Advances in Stored Product Protection. Proceedings of the 8th International Working Conference on Stored Product Protection*, York, UK, 22-26 July, 2002., 2003, p. 244–247.
- [109] C. B. Singh, D. S. Jayas, J. Paliwal, et N. D. G. White, « Identification of insect-damaged wheat kernels using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 73, n° 2, p. 118 - 125, 2010.
- [110] I. Zayas et P. Flinn, « Detection of insects in bulk wheat samples with machine vision », *Trans. ASAE-Am. Soc. Agric. Eng.*, vol. 41, n° 3, p. 883–888, 1998.
- [111] Y. Yang, B. Peng, et J. Wang, « A System for Detection and Recognition of Pests in Stored-grain based on Video Analysis », in *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, Springer, 2011, p. 119–124.

- [112] S.-B. Zhang, H.-C. Zhai, S.-X. Huang, et J.-P. Cai, « A site-directed CO₂ detection method for monitoring the spoilage of stored grains by insects and fungi in Chinese horizontal warehouses », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 59, n° 0, p. 146 - 151, 2014.
- [113] C. H. Bell, « A review of insect responses to variations encountered in the managed storage environment », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 59, n° 0, p. 260 - 274, 2014.
- [114] J. Fornal, T. Jeliński, J. Sadowska, S. Grundas, J. Nawrot, A. Niewiada, J. R. Warchalewski, et W. Błaszczak, « Detection of granary weevil *Sitophilus granarius* (L.) eggs and internal stages in wheat grain using soft X-ray and image analysis », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 43, n° 2, p. 142 - 148, 2007.
- [115] P. W. Flinn, D. W. Hagstrum, C. R. Reed, et T. W. Phillips, « Stored Grain Advisor Pro: Decision support system for insect management in commercial grain elevators », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 43, n° 4, p. 375 - 383, 2007.
- [116] A. Ndiaye, « QualiGrain: a decision support system for management and control of quality of malting barley after harvest », in *Stored malting barley: management of quality using an expert system. Colloque INRA*, 2005, p. 221–257.
- [117] S.-H. Liao, « Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004 », *Expert Syst. Appl.*, vol. 28, n° 1, p. 93–103, 2005.
- [118] B. C. Longstaff, « Decision tools for grain storage pest management », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 33, n° 2, p. 99–114, 1997.
- [119] F. Fleurat-Lessard, « Qualitative reasoning and integrated management of the quality of stored grain: a promising new approach », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 38, n° 3, p. 191 - 218, 2002.
- [120] « Conception et fabrication d'équipements industriels pour le stockage des céréales ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.systelia.fr/>. [Consulté le: 21-déc-2015].
- [121] T. Boivin et B. Sauphanor, « Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes », 2007.
- [122] D. Pimentel, L. McLaughlin, A. Zepp, B. Lakitan, T. Kraus, P. Kleinman, F. Vancini, W. J. Roach, E. Graap, W. S. Keeton, et others, « Environmental and economic effects of reducing pesticide use in agriculture », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 46, n° 1, p. 273–288, 1993.
- [123] P. Damos et M. Savopoulou-Soultani, « Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements », *Psyche J. Entomol.*, vol. 2012, 2011.
- [124] F. Taylor, « Ecology and Evolution of Physiological Time in Insects », *Am. Nat.*, vol. 117, n° 1, p. pp. 1-23, 1981.
- [125] F. G. Zalom et P. B. Goodell, *Degree days: the calculation and use of heat units in pest management*. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, 1983.
- [126] F. Fleurat-Lessard, *Résidus de pesticides dans les céréales alimentaires: Origine, devenir et gestion raisonnée*. .
- [127] D. Hilbert et J. Logan, « Empirical model of nymphal development for the migratory grasshopper, *Melanoplus sanguinipes* (Orthoptera: Acrididae) », *Environ. Entomol.*, vol. 12, n° 1, p. 1–5, 1983.

- [128] M.-P. Leblanc, F. Fleurat-Lessard, et B. Barrier-Guillot, « Projet CasDAR «EcoprotectGrain»: lers résultats de l'enquête nationale sur les insectes des stocks de blé en relation avec l'usage des pesticides et les pratiques de stockage », in 2. *Rencontres du RMT Quasaprove «Recherche appliquée, Formation et Transfert»*. 2011-06-162011-06-16, Paris, FRA, 2011.
- [129] D. W. Hagstrum et G. A. Milliken, « Quantitative analysis of temperature, moisture, and diet factors affecting insect development », *Ann. Entomol. Soc. Am.*, vol. 81, n° 4, p. 539–546, 1988.
- [130] D.-W. Sun et J. L. Woods, « The Moisture Content/Relative Humidity Equilibrium Relationship Of Wheat - A Review », *Dry. Technol.*, vol. 11, n° 7, p. 1523-1551, 1993.
- [131] D. S. Chung et H. B. Pfof, « Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products Part I: Heat and free energy changes of adsorption and desorption », *Trans. ASAE*, vol. 10, n° 4, p. 549–0551, 1967.
- [132] R. Driscoll, B. Longstaff, et S. Beckett, « Prediction of insect populations in grain storage », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 36, n° 2, p. 131–151, 2000.
- [133] L. Birch, « The intrinsic rate of natural increase of an insect population », *J. Anim. Ecol.*, p. 15–26, 1948.
- [134] D. Jayas, K. Alagusundaram, G. Shunmugam, W. Muir, et N. White, « Simulated temperatures of stored grain bulks », *Can. Agric. Eng.*, vol. 36, n° 4, p. 239–246, 1994.
- [135] A. STANDARD, « Thermal properties of grain and grain products », *Am. Soc. Agric. Eng. St Joseph Mich.*, p. 362, 1991.
- [136] R. Sinha et H. Wallace, « Ecology of a fungus-induced hot spot in stored grain », *Can. J. Plant Sci.*, vol. 45, n° 1, p. 48–59, 1965.
- [137] N. White, R. Sinha, et W. Muir, « Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored », *Can. Agric. Eng.*, vol. 24, n° 1, 1982.
- [138] M. W. Street, *Hidden-insect detection by infrared carbon dioxide gas analysis : principles of system design /*, vol. no.S-85. [New Orleans]:Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture,.
- [139] J. Sone, « Carbon Dioxide Production in Stored Maize as Affected by Moisture Content, Level of Broken Corn and Foreign Materials and Infestation by *Sitophilus zeamais* Motschulsky », *J. Asia-Pac. Entomol.*, vol. 2, n° 2, p. 133 - 141, 1999.
- [140] D. Maier, L. Channaiah, A. Martinez-Kawas, J. Lawrence, E. Chaves, P. Coradi, et G. Fromme, « Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain », *Julius-Kühn-Arch.*, n° 425, p. 505, 2010.
- [141] D. Singh, W. Muir, et R. Sinha, « Finite element modelling of carbon dioxide diffusion in stored wheat », *Can. Agric. Eng.*, vol. 25, p. 149–152, 1983.
- [142] D. Singh, W. E. Muir, et R. N. Sinha, « Apparent coefficient of diffusion of carbon dioxide through samples of cereals and rapeseed », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 20, n° 3, p. 169 - 175, 1984.
- [143] R. Hickling, W. Wei, et D. W. Hagstrum, « Studies of sound transmission in various types of stored grain for acoustic detection of insects », *Appl. Acoust.*, vol. 50, n° 4, p. 263 - 278, 1997.

- [144] L. Muda, M. Begam, et I. Elamvazuthi, « Voice recognition algorithms using mel frequency cepstral coefficient (MFCC) and dynamic time warping (DTW) techniques », *ArXiv Prepr. ArXiv10034083*, 2010.
- [145] Z. Le-Qing, « Insect sound recognition based on mfcc and pnn », in *Multimedia and Signal Processing (CMSP), 2011 International Conference on*, 2011, vol. 2, p. 42–46.
- [146] J. Benesty, S. Makino, et J. Chen, *Speech enhancement*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [147] N. Singh, R. Khan, et R. Shree, « MFCC and Prosodic Feature Extraction Techniques: A Comparative Study », *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 54, n° 1, p. 9–13, 2012.
- [148] K. R. Rao et P. Yip, *Discrete cosine transform: algorithms, advantages, applications*. Academic press, 2014.
- [149] M. N. Stuttle, « A Gaussian mixture model spectral representation for speech recognition », University of Cambridge, 2003.
- [150] R. De Maesschalck, D. Jouan-Rimbaud, et D. L. Massart, « The mahalanobis distance », *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 50, n° 1, p. 1–18, 2000.
- [151] F. Buschmann, R. Meunier, H. Rohnert, P. Sommerlad, et M. Stal, *Pattern-Oriented Software Architecture, A System of Patterns*. Wiley, 2013.
- [152] J. L. Richard, « Some major mycotoxins and their mycotoxicoses—An overview », *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 119, n° 1-2, p. 3 - 10, 2007.
- [153] R. L. Semple, N. P.-H. I. for Research, E. (Philippines), R. N. for I.-C. C. on P. H. Technology, et Q. C. of F. (Philippines), *Towards Integrated Commodity and Pest Management in Grain Storage: A Training Manual for Application in Humid Tropical Storage Systems*. REGNET in collaboration with NAPHIRE, 1992.
- [154] G. Shunmugam, D. S. Jayas, N. D. G. White, et W. E. Muir, « Diffusion of carbon dioxide through grain bulks », *J. Stored Prod. Res.*, vol. 41, n° 2, p. 131 - 144, 2005.
- [155] K. K. Paliwal, J. G. Lyons, et K. K. Wójcicki, « Preference for 20-40 ms window duration in speech analysis », in *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2010 4th International Conference on*, 2010, p. 1-4.
- [156] Philipos C. et Loizou, *Speech Enhancement : Theory and Practice*, Second. CRC Press, 2013.

ANNEXE A

1. La méthode MMSE pour dé-bruitage du signal

1) Hypothèses

La méthode MMSE travaille sur la base d'hypothèses concernant les caractéristiques spectrales du signal :

- Les coefficients TFD sont statistiquement indépendants.
 - Les coefficients TFD sont les variables aléatoires qui suivent la distribution de probabilité gaussienne. La moyenne des coefficients est nulle, et les variances des coefficients sont variantes dans le temps en raison de la non-stationnarité du signal.
- 2) la dépendance de la fonction du gain sur le paramètre ξ_k et γ_k

On rappelle l'estimateur MMSE optimal sous la forme d'une fonction de gain spectral suivant :

$$\hat{X}_k = G(\xi_k, \gamma_k) Y_k$$

Le paramètre ξ_k mesure le ratio signal propre sur bruit (appelé RSB a priori), tandis que le paramètre γ_k mesure le ratio signal bruité sur bruit (appelé RSB a posteriori). Le RSB a priori ξ_k peut être considéré comme le vrai RSB de k^{th} composant spectral.

$$\gamma_k = \frac{Y_k^2}{\lambda_d(k)} \qquad \xi_k = \frac{\lambda_x(k)}{\lambda_d(k)}$$

Où :

- Y_k : le k^{th} composante spectrale du signal bruité ;
- $\lambda_d(k)$: la variance de k^{th} composante spectrale du bruit ;
- $\lambda_x(k)$: la variance de k^{th} composante spectrale du signal propre.

La variance du bruit $\lambda_d(k)$ peut être estimée en supposant que le bruit est stationnaire, et peut être calculée dans les zones d'absence du signal utile [156]. En fin, RSB à priori ξ_k est estimée par la méthode « Decision-Directed ».

La fonction de gain $G(\xi_k, \gamma_k)$ dépend des paramètres ξ_k et γ_k . Les figures suivantes représentent l'influence des paramètres de gain ξ_k, γ_k . On s'aperçoit que ξ_k constitue le paramètre le plus important dans l'estimation de la présence du signal utile.

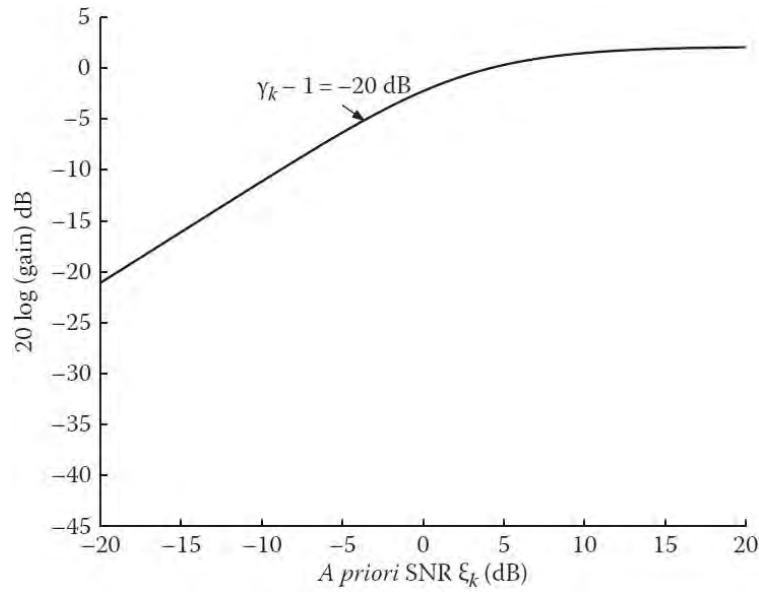


Figure 82 : La courbe d'atténuation de l'estimateur MMSE en fonction de ξ_k

La fonction de gain dépend fortement des valeurs de RSB a priori ξ_k . En fixant: $\gamma_k - 1 = -20\text{dB}$ (on appelle $(\gamma_k - 1)$ est RSB instantané), la Figure 82 présente la dépendance de la fonction du gain sur le paramètre ξ_k . Dans les zones sans signal utile, les valeurs de RSB a priori ξ_k sont petits, on obtient les fortes atténuations sur la courbe. Inversement, pour les zones où le signal utile est présent, les valeurs ξ_k sont grandes, la courbe d'atténuation tend vers 0.

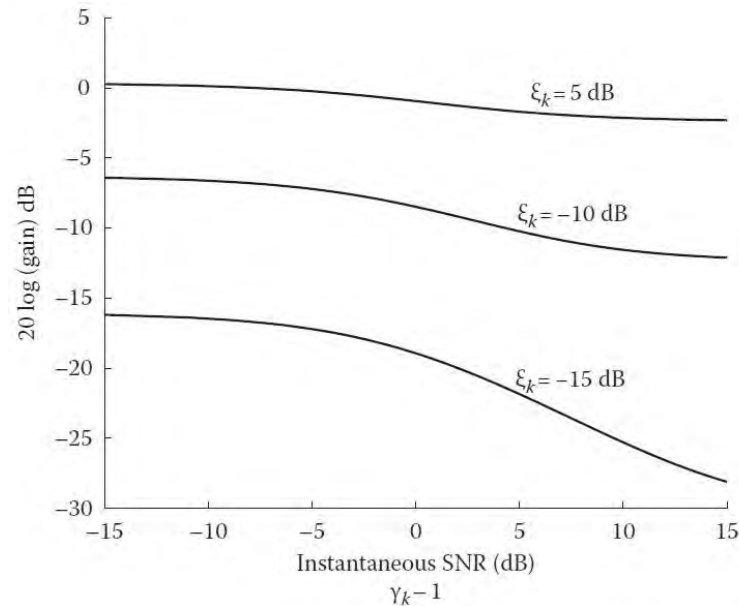


Figure 83 : La courbe d'atténuation de l'estimateur MMSE en fonction de γ_k

La Figure 83 présente la dépendance de la fonction de gain du paramètre γ_k en fixant des valeurs différentes des paramètres ξ_k . Avec des valeurs de $\xi_k \geq -10\text{dB}$, on constate que la courbe de atténuation est relativement plate (petit effet sur l'atténuation) pour un large intervalle de valeur γ_k . Dans ces cas, l'atténuation de la fonction de gain ne dépend que de la valeur de ξ_k . L'effet de γ_k sur

l'atténuation est évident seulement pour les valeurs extrêmement faibles de ξ_k . Cependant, le comportement de suppression en fonction de γ_k est contraire : si les valeurs de γ_k sont élevées, on obtient plus d'atténuation. Le paramètre RSB γ_k dans ce cas est comme le facteur de correction : la faible valeur de ξ_k nous dit qu'il n'y a pas de présence signal utile, si le bruit dans certains segments produit une valeur élevée de γ_k , la fonction de gain augmente l'atténuation sur ces segments. Ce comportement est particulièrement utile pour traiter le bruit non-stationnaire où le niveau de bruit peut dépasser son niveau moyen.

En résumé, la méthode MMSE peut être mise en œuvre suivant les étapes suivantes :

- Étape 1 : Calcul TFD de signal bruité : $Y(\omega_k) = Y_k \exp(j\theta_y(k))$
- Étape 2 : Estimation du RSB a posteriori $\gamma_k = Y_k^2 / \lambda_d(k)$, d'où $\lambda_d(k)$ est la variance de k^{th} spectral component du bruit calculée dans la zone sans signal utile. Puis, l'estimation RSB a priori ξ_k par la méthode «decision-directed»
- Étape 3 : Estimation de la magnitude spectrale du signal propre par la formule
$$\hat{X}_k = G(\xi_k, \gamma_k) Y_k$$
- Étape 4 : Construction du spectre du signal propre avec la phase du signal bruité, puis faire la transformée de Fourier inverse de $\hat{X}(\omega_k)$ afin d'obtenir le signal propre $\hat{x}(n)$ dans le domaine temporelle :

$$\hat{X}(\omega_k) = \hat{X}_k \exp(j\theta_y(k))$$

- 3) Estimation RSB a priori par la méthode «Decision-Directed»

$$\xi_k(m) = a \frac{\hat{X}_k^2(m-1)}{\lambda_d(k, m-1)} + (1-a) \max[\gamma_k(m) - 1, 0]$$

L'équation est appelée l'estimateur «Decision-Directed» parce que $\hat{\xi}_k(m)$ est mis à jour en utilisant les informations de l'estimation magnitude spectral de frame précédent

2. Estimation des paramètres du modèle de mélange GMM

Le modèle de mélange est caractérisé par l'ensemble des paramètres $\theta = (\pi_1, \dots, \pi_k, \alpha_1, \dots, \alpha_k)$. À partir des données observées, on souhaite estimer les paramètres du modèle.

Dans le cadre de l'estimation statistique, le paramètre θ est inconnu et devrait être estimé à partir de l'échantillon x par la méthode du maximum de vraisemblance (MV). La formule de log-vraisemblance est donnée par :

$$L(\theta; x) = \sum_i \log \left(\sum_k \pi_k f(x_i, \alpha_k) \right)$$

On trouve que la formule log-vraisemblance contient la somme des composantes dans l'algorithme : l'équation de vraisemblance ne possède pas de solution analytique, alors les algorithmes d'optimisation peuvent être compliqués à mettre en œuvre. Pour résoudre ce problème, on utilise l'algorithme EM (Espérance-Maximisation).

2.1. L'algorithme EM

On choisit les paramètres initiaux θ^0 de manière arbitraire, l'algorithme EM répète les deux étapes suivantes jusqu'à ce qu'il converge :

- Étape E: Pour l'itération m , on calcule les probabilités conditionnelles t_{ik} que l'individu x_i appartient à la composante k pour la valeur courante du paramètre du mélange :

$$t_{ik}^m = p(z_{ik} = 1 | X_i = x_i; \hat{\theta}^m) = \frac{\pi_k^m f(x_i; \alpha_k^m)}{\sum_l \pi_l^m f(x_i; \alpha_l^m)}$$

Ces probabilités t_{ik} servent de poids à chaque individu x_i dans la phase d'estimation (l'étape M).

- Étape M: On met à jour l'estimation des paramètres en maximisant de la vraisemblance des données observées

$$\pi_k^{m+1} = \frac{n_k}{n}, \text{ avec } n_k = \sum_i t_{ik}^m$$

α_k^{m+1} : Résolution d'équation de vraisemblance. Pour le cas de modèle de mélanges gaussiens, $\alpha_k = (\mu_k, \Sigma_k)$, on estime ces paramètres par l'équation suivante :

$$\mu_k^m = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^n t_{ik}^m x_i \quad \text{et} \quad \Sigma_k^m = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^n t_{ik}^m (x_i - \mu_k)(x_i - \mu_k)'$$

L'algorithme s'arrête après un nombre prédéfini d'itérations ou bien à la stationnarité du critère de log-vraisemblance observées

2.2. Propriétés d'EM

EM fait croître la vraisemblance à chaque itération.

L'algorithme EM peut converger en plusieurs points de maximum local de la fonction log-vraisemblance. Il dépend les valeurs des paramètres initiaux θ^0 . Pour une recherche plus efficace du maximum global, il faut faire plusieurs essais avec différentes valeurs des paramètres initiaux, puis on ne retient que la solution donnant la plus grande vraisemblance.

ANNEXE B

Nous présentons dans cette annexe les schémas des différents circuits conçus dans le cadre de notre thèse et développés avec l'appui de VALCAP et de l'Atelier Electronique du laboratoire, afin de mettre en œuvre les modules SILOTEST 1

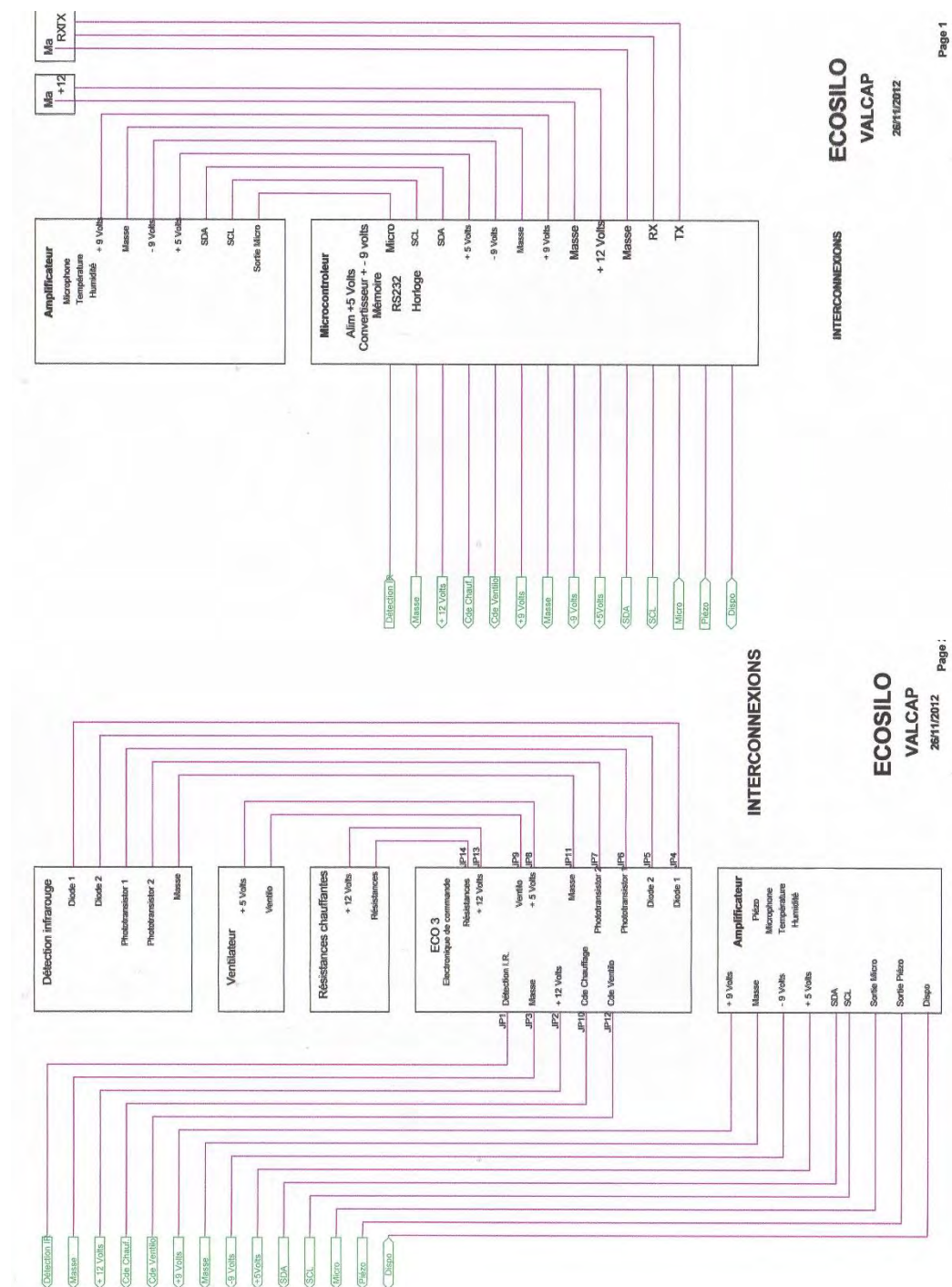


Figure 84 : Interconnexion des différentes cartes électroniques embarquées dans la sonde SILOTEST 1

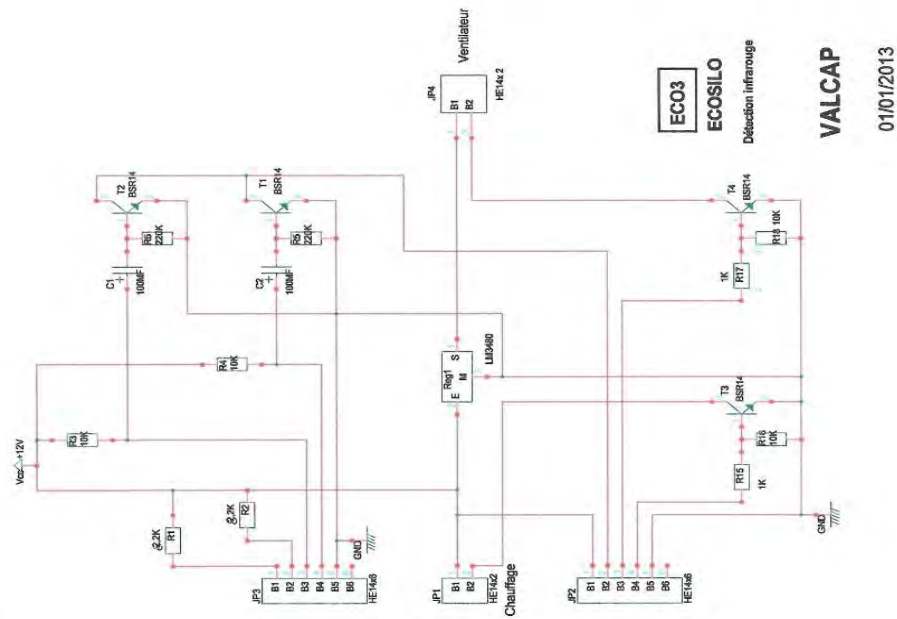


Figure : Circuit de la détection optique

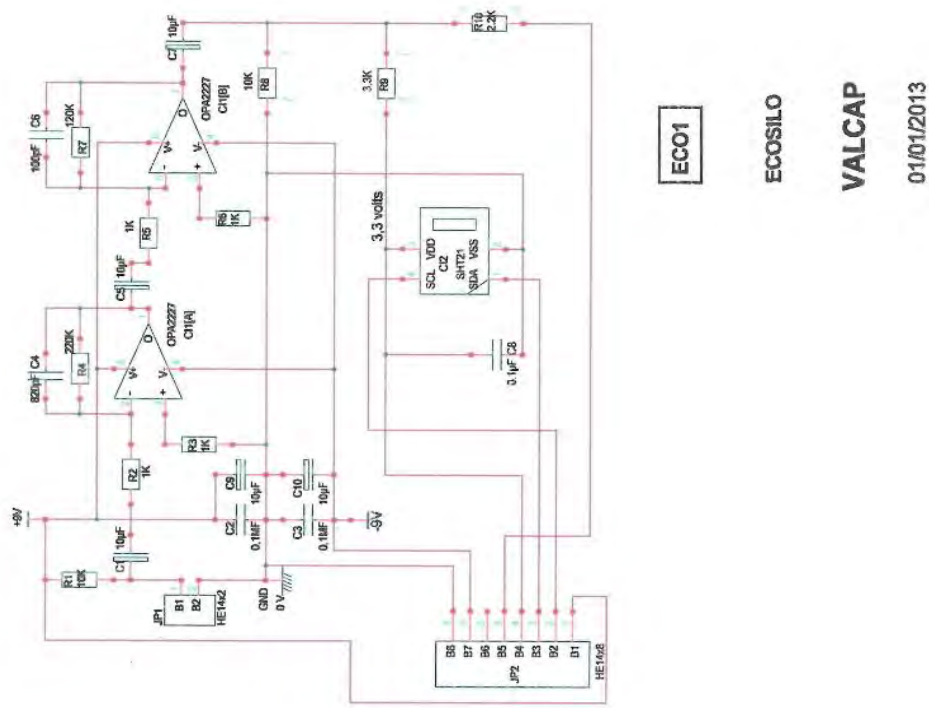


Figure 85 :Circuit amplificateur et capteur de température et d'humidité

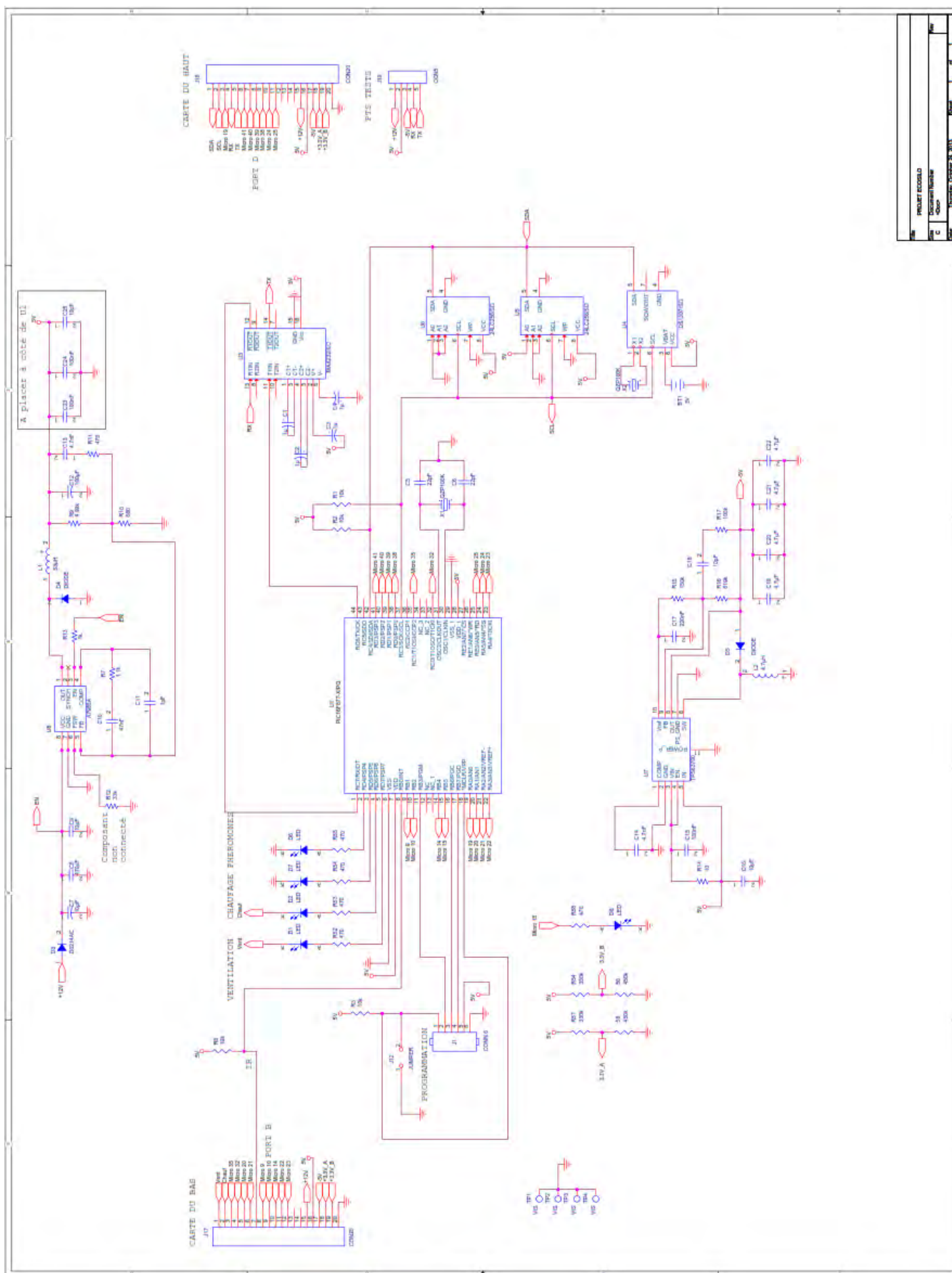


Figure 86 : schéma électrique de la carte contrôleur de la sonde SILOTES1

1.1. SILOTEST2

La Figure 87 présente le schéma fonctionnel des cartes embarquées dans le SILOTEST 2. Le premier circuit (circuit V1-1) comporte la carte Fubarino SD ainsi qu'un amplificateur le circuit V1-2 ne comporte qu'un amplificateur (voir la Figure 91).

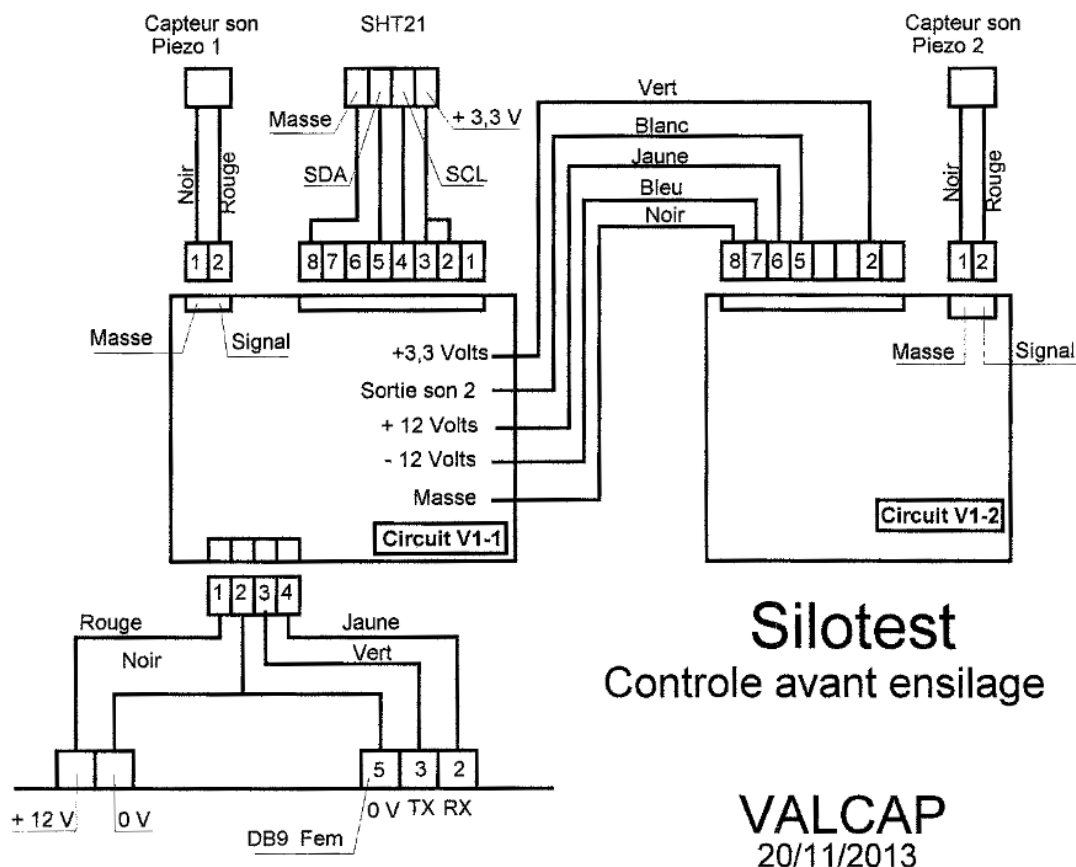


Figure 87 : Schéma fonctionnel des cartes embarquées dans le SILOTEST2

Pour la mise en œuvre du SILOTEST2 nous avons utilisé une carte Fubarino SD avec le même amplificateur et les mêmes capteurs utilisés dans SILOTEST3. Ce choix a été fait pour simplifier l'acquisition des données acoustiques qui sont assez volumineuses. Avec son pic embarqué cadencé à 50 MHz et la communication via le port USB cette tâche est rendue facile.

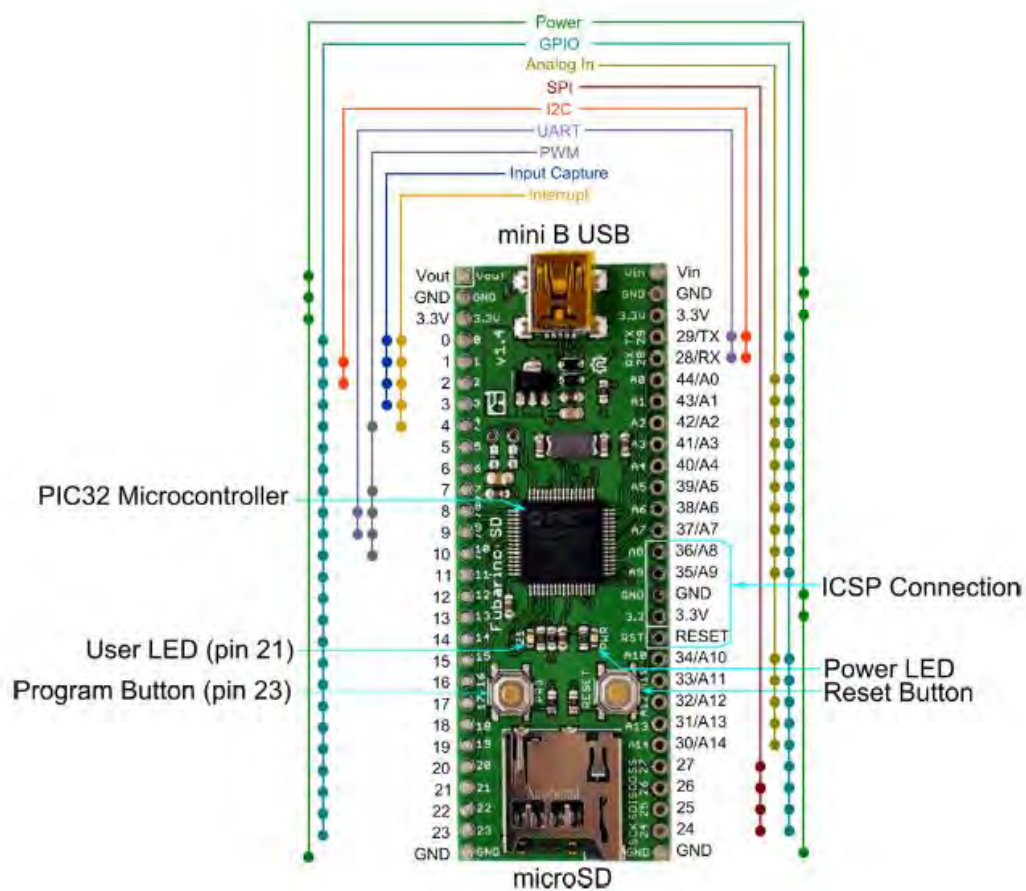


Figure 88 : Fiche technique de la carte Fubarino SD

1.2. SILOTEST 3

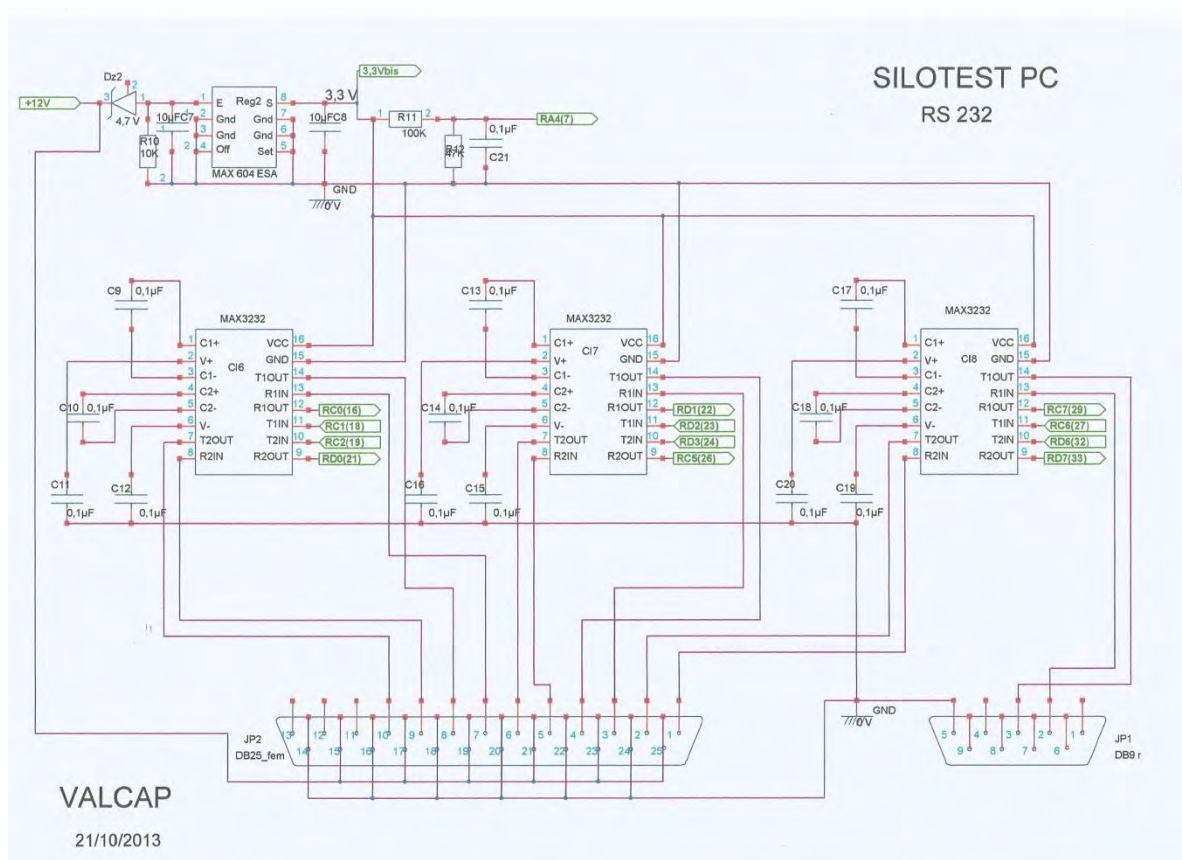


Figure 89 : Schéma électrique de la carte pc de la sonde SILOTEST 3

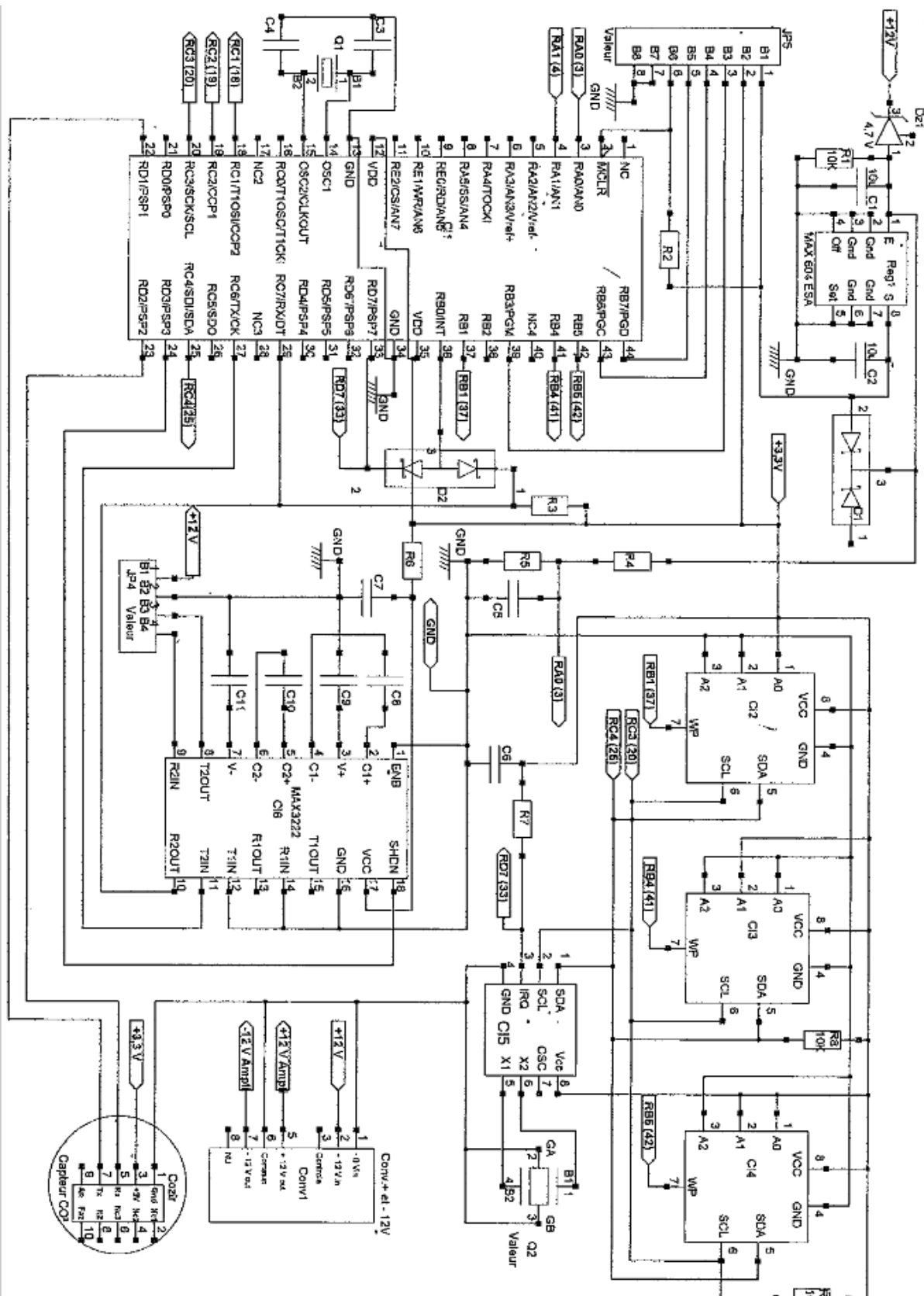


Figure 90 : Schéma électrique de la carte du module SILOTEST 3

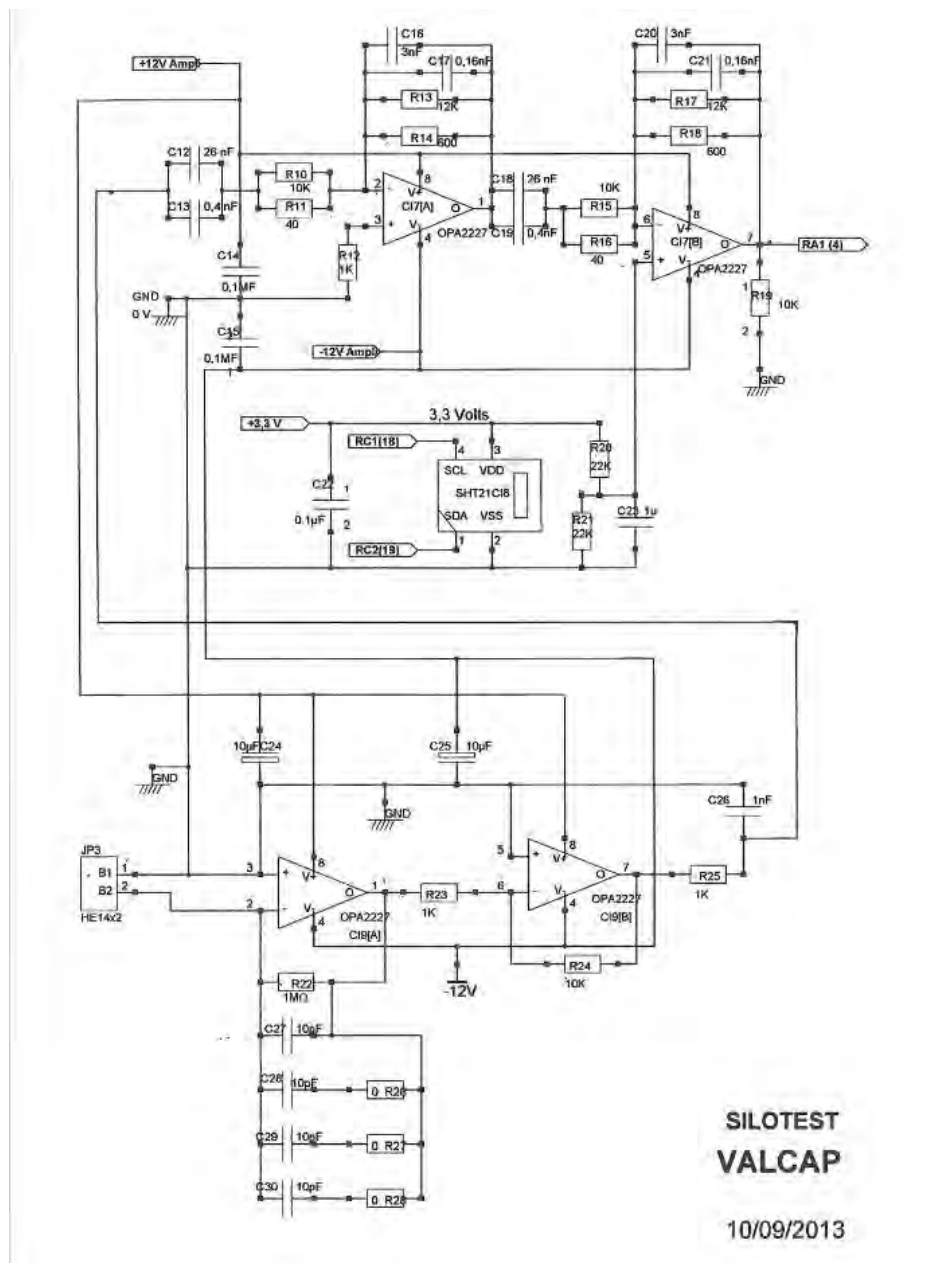


Figure 91: Filtre passe bande et l'amplificateur embarqué dans le module SILOTEST3

LISTE DES PUBLICATIONS PERSONNELLES

Revue Internationale (avec actes et comité de lecture)

Il est important de préciser que les travaux réalisés ainsi que les résultats obtenus dans le cadre du projet ECOSILO n'ont pas encore été publiés car ils vont être brevetés. Une étude de brevabilité a été effectuée et le dépôt d'un brevet est en cours d'étude avec Toulouse Tech Transfert (TTT).

W.BOURENNANE, Y.CHARLON, F.BETTAHAR, E.CAMPO, D.ESTEVE

“Homecare monitoring system: A technical proposal for the safety of the elderly experimented in an Alzheimer's care unit”

Revue Scientifique : IRBM, Vol.34, N°2, pp.92-100, Avril 2013, N° 13162

Y.CHARLON, W.BOURENNANE, F.BETTAHAR, E.CAMPO

“Activity monitoring system for elderly in a context of smart home”

IRBM, Vol.34, N°1, pp.60-63, Mars 2013, N° 13028

W.BOURENNANE, Y.CHARLON, F.BETTAHAR, M.CHAN, D.ESTEVE, E.CAMPO

“Ambient intelligence for monitoring Alzheimer patients”

International Journal of E-Health and Medical Communications, Vol.4, N°1, pp.23-35, Janvier 2013, N° 12234

Conférences Internationales (avec actes et comité de lecture)

Y.CHARLON, E.CAMPO, D.BRULIN, F.BETTAHAR, A.PIAU

“Smart insole for measuring actimetry of frail people”

Med-e-Tel 2015 du 22 avril au 24 avril 2015, Luxembourg (Luxembourg), Avril 2015, 7p. , N° 15068

W.BOURENNANE, F.BETTAHAR, E.CAMPO

“Self-adaptive trajectory learning for monitoring the elderly wandering”

IASTED International Conference on Biomedical Engineering (BioMed) 2013 du 13 février au 15 février 2013, Innsbruck (Autriche), Mars 2013, 6p. , N° 13035

Y.CHARLON, F.BETTAHAR, E.CAMPO

“Design of a smart shoe insole to monitor frail older people”

International Conference on Modern Well-being for Societies and Territories (LivInWell) 2013 du 25 mars au 27 mars 2013, Sainte Feyre (France), Mars 2013, 6p. , N° 13374

Conférences Nationales (avec actes et comité de lecture)

F.BETTAHAR, W.BOURENNANE, Y.CHARLON, E.CAMPO

“HOMECARE: une plateforme technique de surveillance pour le suivi actimétrique de patients Alzheimer”

Workshop – Alzheimer, Approche pluridisciplinaire. De la recherche clinique aux avancées technologiques (ALZHEIMER) 2013 du 25 janvier au 25 janvier 2013, Toulouse (France), Janvier 2013, pp.87-98, N° 13522