

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد بوضياف-المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE DE SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES
N° : .../......./...../.....



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES
OPTION : PRODUCTION VEGETALE

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique

par: **AROSSI WIAM** et **BOUAFIA DAHBIA**

Intitulé

Fabrication de bio-anti gel avec Système de Pulvérisation
Intelligent pour les Produits Chimiques et naturel Agricoles

Soutenu devant le jury composé de:

M.TAYEB BENSACI	PROF	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Président
RAMDANE BENNIUO	PROF	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Rapporteur
SALAH-EDDINE KENNOUF	MCA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Rapporteur
LEILA ATTLAOUI	MCB	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examineur
MOSTAFA TABBAKH	MCB	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد بوضياف – المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'Sila



**FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

RAPPORT DE PROJET DE FIN DE CYCLE

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE EN ELECTRONIQUE

OPTION : ELECTRONIQUE

Intitulé

***Système de Pulvérisation Intelligent pour les
Produits Chimiques Agricoles
(Cas d'application : Bio-Anti-Gel)***

2023/2024

*R*emerciements

Nous remercions avant tout ALLAH Tout-Puissant de nous avoir guidés tout au long de notre vie, durant toutes nos années d'étude, et de nous avoir donné la foi, la volonté, la patience et le courage nécessaires pour terminer ce travail.

Au terme de ce mémoire, nous tenons particulièrement à exprimer notre profonde gratitude à nos encadrants, Dr Ramdane BENNIOU, professeur au département des sciences agronomiques, et Dr Salah-Eddine KENNOUF, professeur au département d'électronique, pour leurs minutieuses orientations, leurs efficace contributions et leurs compréhensions tout au long de son élaboration.

Nous souhaitons également adresser nos sincères remerciements au Dr Tayeb BENSACI, professeur et doyen de la faculté des sciences, d'avoir honoré et accepté de présider ce jury.

Nous remercions également au Dr Leila ATTILAOUI et au Dr Mostafa TABBAKH d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir examiné ce modeste travail.

Nous tenons aussi à remercier vivement messieurs Ismail DAFAR, et Pr Ahmad ADAA, de l'université de Tiaret, pour l'aide et les conseils précieux qu'ils nous ont apportés tout au long de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements au responsable de la société Frigomédite, qui nous a accueillis et a donné son approbation pour réaliser une partie expérimentale importante de ce travail.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve ici l'expression de notre profonde gratitude et reconnaissance.

Merci

DEDICASE :

À moi-même, qui ai été la source de ma force et de ma patience. Je dédie ce travail en reconnaissance de ma détermination et de mes efforts continus pour atteindre mes objectifs.

À ma chère mère Fatima et à mon cher père Salah, les mots ne peuvent exprimer toute ma gratitude et mon amour pour vous. Merci pour votre soutien inconditionnel et vos sacrifices immenses. Je prie Allah de vous accorder santé et bonheur, et que vos bénédictions m'accompagnent toujours.

À mes chers frères et sœurs, merci pour votre soutien et votre amour. Vous êtes mon pilier et ma force.

À ma chère grand-mère, qui a été comme une deuxième mère pour moi, j'adresse mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude. Vos prières et votre sagesse ont toujours été une source d'inspiration pour moi. Je demande à Allah de vous accorder santé et bien-être.

À mes amies Saïda et Asmahan, merci pour votre amitié et votre soutien constant.

À mon enseignant Abdeli Massoud, j'exprime mes plus sincères remerciements et ma reconnaissance. Merci pour tout ce que vous avez apporté en matière de connaissance.

À mon ami Ridouane, merci pour ton soutien. Tu as toujours été un pilier essentiel dans la réalisation de mes objectifs.

Dédicace

Louange à Dieu, qui m'a donné la force et insufflé la volonté nécessaire pour mener à bien ce travail. Louange éternelle à Lui, pour l'accomplissement de cette œuvre et pour toutes les autres bénédictions qu'Il m'a accordées. Celui qui ne remercie pas Dieu, ne saura jamais être reconnaissant envers les autres.

Pour moi, pour être ma source de force et de persévérance. Je dédie ce travail en reconnaissance de ma persévérance et de mes efforts continus pour atteindre mes objectifs.

À ma chère mère, UMM AL-KHAIR, et à mon cher père, ABDUL QADIR, il n'y a pas de mots pour exprimer toute ma gratitude et mon amour pour vous. Merci pour votre soutien inconditionnel et vos innombrables sacrifices. Je prie pour votre santé et votre bonheur, et pour que vos bénédictions m'accompagnent toujours.

À mes frères FOUAD ET MABROUK, à mes sœurs WAHIBA, AMAL, LUBNA ET DELILA, ainsi qu'à vos enfants, merci pour votre amour et votre soutien indéfectibles. Tu es mon soutien, ma force et ma source sans fin de sécurité

A la chère famille AROUSSI ET HAMOUDI , je vous adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude. Vous avez toujours été là pour moi quand j'en avais besoin, alors que Dieu continue de vous soutenir. À ISMAIL DAFAR ET SA FILLE ZAINAB, qui m'ont considéré comme leur fille tout au long de mon travail sur ce mémoire de fin d'études. Merci pour votre soutien et votre amour pour moi.

À mes amis, Amira, HAJIRA, RANIA, ASMA, SHAHNAZ, MARYAM, KHADIJA, ZAHRA, REHAB, WISSAL, ISHRAQ ET DALAL, lydia , ibtiha, zayneb, elkhansa, sarra vous avez tout mon amour et mes remerciements pour être restés à mes côtés pendant toute la période où je vous connais. je vous garderai toujours comme mes compagnons.

wiam

Plan du travail

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction

Première Partie : Volet Agronomique

Partie I : Synthèse bibliographique.....

Chapitre 01 :Généralités sur le gel et les méthodes de protection	16
1.1. Définition du gel.....	16
1.2 Classification du gel	17
1.2.1. Critères de formation du gel.....	17
1.2.2. Critères du gel total ou partiel	18
1.2.3. Critères de gel de l'humidité	18
1.2.4. Critères de sévérité du gel	19
1.3 Évaluation géographique des dommages causés aux cultures par le gel.....	19
1.4 Dommages causés par le gel : physiologiques, économiques et températures critiques	22
1.4.1 Lésions cellulaires	22
1.4.2. Sensibilités des plantes	22
1.4.3. Cultures annuelles et bisannuelles.....	24
1.4.4. Cultures pérennes	27
1.4.5. Arbres fruitiers	27
1.4.6. Dommages économiques causés par le gel.....	28
1.5. Aperçu historique sur la protection contre le gel.....	29
1.6. Méthodes de protection contre le gel.....	31
1.6.1 Protection passive.....	31
1.6.1.1 Sélection et gestion du site	31
1.6.1.2 Drainage de l'air froid.....	32
1.6.1.3. Couvertures végétales.....	33
1.6.1.4. Sélection de plantes adaptées au gel.....	34
1.6.2. Protection active	35
1.6.2.1. Appareils de chauffage	35
1.6.2.2. Machines éoliennes	36
1.6.2.3 Aspersions (arroseurs).....	37
1.6.2.4. Protection chimique contre le gel	38
1.7 Situation de gel en Algérie	39

Chapitre 02 : Généralités sur la culture du piment	41
2.1. Historique et origine du piment.....	41
2.2. Présentation de la filière de piments.....	41
2.2.1. Situation de piments dans le monde	42
2.2.2. Présentation de la filière de piments en Algérie	43
2.2.2.1. Variétés les plus cultivées en Algérie.....	43
2.2.2.2. Evolution de la production de piments en Algérie	43
2.3. Description de la plante	44
2.3.1. Description et classification botanique.....	44
2.3.2. Description morphologique	44
2.3.2.1 Appareil végétatif	44

2.3.2.1.1 Système racinaire	44
2.3.2.1.2 Système aérien.....	45
2.3.2.1.3 Feuilles du piment	45
2.3.2.1.4 Fleur.....	46
2.3.2.1.5 Fruit du piment	46
2.3.2.1.6 Graine	47
2.3.2.1.7 Stades phénologiques	47
2.3.3 Exigences écologiques de la culture de piments	48
2.3.3.1 Sols	48
2.3.3.2 Climat	48
2.3.3.3 Irrigation.....	48
2.4. Conduite de la culture.....	49
2.4.1 Mode de culture du piment en Algérie.....	49
2.4.1.1 Préparation du sol	49
2.4.1.2 Semis et plantation	50
2.4.1.3 Fertilisation et irrigation.....	50
2.4.1.4 Protection phytosanitaire	50
2.4.1.5 Maladies et ravageurs et méthodes de lutte	51
2.5 Récolte.....	52
Partie II : Expérimentation	53
Chapitre 1 : Matériels et méthodes.....	54
1.1. Objectif de l'étude	54
1.2.1. Evaluation du gel.....	55
1.2.2 Enquêtes auprès des agricultures.....	57
1.2.3. Travail de laboratoire	57
1.2.3.1. Confectionnement du produit	57
1.2.3.1.1. Première étape: Extraction des matières.....	57
1.2.3.1.2. Deuxième étape : Formulation	57
1.2.4. Expérimentation sur l'efficacité de l'antigel	57
1.2.4.1. Présentation de la région de M'sila et du Site expérimental de Boukhmissa	57
1.2.4.2. Caractéristiques du sol.....	59
1.2.4.3. Caractéristiques climatiques	60
1.2.4.3.1 Températures	60
1.2.4.3.2. Précipitations	60
1.2.5. Dispositif expérimental	61
1.2.6. Traitements au froid	62
1.2.7. Mise en place de la culture	63
1.2.8. Paramètres suivis de la culture après la plantation dans le champ	64
Chapitre 2 : Résultats et discussion	66
2.1 Evaluation des épisodes de gel	66
2.1.1 Résultats des études climatiques	66
2.1.2 Résultats des enquêtes relatives à l'effet du gel dans quelques wilayas marichères	67
2.2. Résultats sur la confection du produit	68
2.2.1. Etape 1. Extraction et ou utilisation des matières premières à partir de produits naturels	68
2.2.1.1. Protocole d'extraction de la pectine (Javeria, 2020)	68
2.2.2. Formulation du produit (protocole de fabrication de l'antigel).....	69
2.3 Résultats sur l'efficacité du produit.....	71
2.3.1 Caractéristiques morphologiques	71
2.3.1.1. Hauteur des tiges (HT en cm).....	71
2.3.1.2. Nombre de tiges par plante (NT/P)	73
2.3.1.3. Nombre de feuilles par plante (NF/P)	76
2.3.1.4. Nombre de Fleurs par plante (NFr/P).....	79

2.3.2. Caractéristiques agronomiques.....	82
2.3.2.1. Poids des fruits (en g) par plante	82
2.3.2.2. Rendement calculé de fruits (q/ ha).....	85
2.3.3 Conclusion.....	87

Deuxième Partie : Volet Électronique

Parti III : Système de Pulvérisation Intelligent pour les Solutions à Usages Agricole	90
III.1 Introduction	91
III.2 Partie théorique.....	92
III.2.1 Carte Arduino Uno	92
III.2.2 Module GSM (SIM 800L).....	93
III.2.3 Afficheur à Cristaux Liquides (ou LCD).....	94
III.2.4 Capteur d'humidité et de température (DHT22)	95
III.2.5 Plaque d'essai (ou Breadboard).....	96
III.2.6 Câblage des circuits électroniques.....	97
III.2.7 Sources d'énergie	97
III.2.7.1 Energie Solaire	97
III.2.7.2 Batterie	98
III.3 Partie Pratique	99
III.3.1 Principe de Fonctionnement	99
III.3.2 Simulation avec Proteus	99
III.3.3 Réalisation sur plaque d'essai	101
Conclusion	103
References bibliographiques	105

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique

C.M : Carrée Moyenne

C.V : Coefficient de Variation

DDL : Degrés de Liberté

E.T : Écart Type

FAO : Food and Agriculture Organisation

pH : Potentiel Hydrogène

CaCO₃ : Carbonate de calcium

Tmax : Température maximale

Tmoy : Température moyenne

Tmin : Température minimale

KCl : Chlorure de potassium

J.-C. : Jésus-Christ

DSA : Direction des services agricole

m³/ha : Mètres cubes par hectare

q/ha : Quintaux par hectare

S.C.E : Sommes des Carrés des Écarts

TEST F : Test statistique F

PROB : Probabilité

mmhos/cm⁻¹ : mmhos par centimètre

HCl : Acide chlorhydrique (chlorure d'hydrogène)

P : Significativité statistique (probabilité)

IAASA : International Institute for Applied Systems Analysis

Liste des figures

Figure 01: Caractéristiques du gel d'advection (Hannan, 2019).....	18
Figure 02: Schéma de principe du givrage de la surface de la plante dans des conditions naturelles de rayonnement : (a) conditions naturelles de formation de givre par rayonnement ; (b) principe de la formation de givre a la surface de la plante (Huangsongal., 2021).	19
Figure 03 : Période «sans gel», climat de 1981 à 2010 (Source : FAO et IIASA, 2021)	20
Figure 04: Nombre annuel moyen de jours de gel, moyenne pour la période 1981-2010 (Source: FAO et IIASA, 2021)	21
Figure 05 : Schéma de deux types de lésionscryogéniques dans le processus de congélation. La structure moléculaire.....	22
Figure 06 : Critères de sélection du site (oliver, 2022)	32
Figure 07 : Rinçage à l'air froid (Keith, 2005)	33
Figure 08 : Couvertures végétales (Oxana, 2023).....	34
Figure 09: Changement de température dans l'environnement avec le mouvement vertical du flux d'air chaud sortant d'un appareil de chauffage (Snyder et Melo Abreu, 2005	36
Figure 10 : Appareils de chauffage (Alibayât, 2022	36
Figure 11 : Variation de la température de l'air dans le sens vertical avec l'éolienne désactivée (a) et le démarrage (b) (Snyder et Melo Abreu, 2005).	37
Figure 12 : Exemple de protection contre le gel avec irrigation par aspersion (Ali bayat, 2022)	38
Figure 13: Système racinaire du piment (Badache, 2015)	44
Figure 14: Plante du piment (Source: Francisco Jose 2018)	45
figure 15: Aspect de la feuille du piment (Badache, 2015)	45
Figure16: Fleurs du piment (Badache, 2015)	46
Figure 17: Fruits du piment (Badache, 2015)	47
Figure 18: Semences du piment (Badache, 2015)	47
Figure19: Carte de la wilaya de M'sila par commune. (SiteGifex ; cartes du monde entier 2024)	58
Figure 20: Situation et délimitation de la région d'étude (Google Earthe, 2023)	59
Figure 21 : Courbe pluviométrique dans la région de M'Sila (Source: WeatherSpark, 2024).	61
Figure 22: Dispositif expérimental.....	62
Photo originale 23: Pulvérisation des plants juste avant le traitement au froid	63
Photo originale 24: Réglage de la température de la chambre froide	63
Photo originale 25: Mise on place des traitements dans la chambre froide	63
Photo originale 26: Irrigation juste après la mise en place de la culture de piment par traitement.....	64
Figure 27 : Résultat de l'extraction de pectine	69
Photo originale 28: Antigels formulés	71
Figure 29: Effet des traitements antigel et le mode de traitement sur la hauteur de la plante	73
Figure 30: Effet des inter actions des traitement et les parties traitées de la plante sur le nombre de tiges par plante.....	76
Figure 31: Effet d'interaction de la partie de plante et les traitements antigel sur le nombre de feuilles par plante.....	79
Figure 32: Effet des traitements antigel en fonction des parties traitées de la plantsur le nombre de fleurs par tige	81
Figure 33: Mesure de poids de fruits de piment sur une balance de précision	83
Figure 34: Effet d'interaction de la partie de la plante traitée et le traitement antigel sur le poids de fruits.....	84
Figure 35: Effet d'interaction de la partie de la plante traitée et le traitement antigel sur le rendement	87
Figure 36 : Coupe vertical d'un fruits de piment (photo originale)	87
Figure 37 : Dépôt du gel sur les plantes	91
Figure 38: Carte Arduino Uno	93
Figure 39 : Module GSM (SIM 800L)	93
Figure 40 : Afficheur à Cristaux Liquides (LCD)	94
Figure41: Structure Interne d'un LCD	95

Figure 42 : Capteur d'humidité et de température (DHT22)	95
Figure 43: Types de plaques d'essai (Breadboard)	96
Figure44 : Types de câblage des circuits électroniques	97
Figure 45 : Système de production d'énergie solaire	98
Figure 46 : Types de batterie.....	98
Figure 47 : Circuit du Système SPA dans ISIS	100
Figure 48 : Circuit du Système SPA dans ARES	100
Figure 49 : Interface IDE du notre Programme.....	101
Figure 50 : Réalisation de notre système sur plaque d'essai	101

Liste des tableaux

Tableau 1 : Terminologie des événements de gel et caractéristiques typiques (FAO, 2005).....	19
Tableau 2 : Sensibilité des fruits et légumes frais aux dommages causés par le gel (Wang, & Wallace, 2003)....	23
Tableau 03: Symptômes des dommages causés par le gel pour les cultures maraichères (Caplan, 1988).....	25
Tableau 04 : Seuil critique de températures (°c) pour les cultures de grains, de fourrage et d'ensilage (Ventskevich, 1958).	26
Tableau 05: Meilleurs pays producteurs des piments en 2014, (Heidi Young, 2022 et Bouragaa, 2019)	42
Tableau 06: Production africaine des piments frais et secs (FAO, 2019 in Bouragaa, 2019).	43
Tableau 08: Calendrier culturel du piment (Oumane .S 2019)	49
Tableau 09: Principales maladies et ravageurs du piment et méthodes de luttés (Fondio et al., 2009	51
Tableau 10 : Résultats des analyses physicochimiques des échantillons de sols de la zone d'étude	60
Tableau 11: Température moyenne maximale et minimale à M'Sila (°c) de la période (2016-2024).....	60
Tableau 12 : Pluviométrie mensuelle moyenne à M'Sila (en mm) (2016-2024) .weatherspark (2024).....	61
T'ableau 13: Résultats de l'analyse des épisodes du gel dans les wilayas les plus affectées.	66
Tabule 14: Résultats des enquêtes chez quelques agriculteurs.....	68
Tabluae 15: Analyse de la variance pour la hauteur de tige.....	71
Tableau 16: Analyse de moyennes de la hauteur de la plante en fonction des traitements par partie traitée.	73
Tableau 17: Groupes homogènes pour le facteur traitement antigel	73
Tableau 18 : Analyse de la variance du nombre de tige.....	74
Tableau 19: Test de signification à deux facteurs, effet de traitement antigel, partie de plante traitée et leurs interactions pour le nombre de tiges par plante	75
Tableau 20: Groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de tiges par plante pour la partie traitée de la plante.....	75
Tableau 21: Groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de tiges par plante pour le traitement antigel.....	75
Tableau 22: Analyse de la variance du le nombre de feuilles par plante	76
Tableau 23: Test de signification à deux facteurs, effet de traitement antigel, partie de plante traitée et leurs interactions pour le nombre de feuilles par plante.....	78
Tableau 24: Goupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de feuilles par plante pour la partie traitée de la plante.....	78
Tableau 25: Groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de feuilles par plante pour le facteur traitement antigel.....	78
Tableau 26: Analyse de la variance du nombre de fleurs	79
Tableau 27: Test de signification à deux facteurs de l'effet du traitement antigel et de la partie traitée de la plante, ainsi de leurs interactions pour le nombre de fleurs par plante.....	81
Tableau 28 : Groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de fleurs par plante pour les traitements antigel.....	81
Tableau 29: Analyse de la variance du poids de fruits par plante	82
Tableau 30: Test de signification à deux facteurs, de l'effet de traitement antigel et la partie traitée de la plante et leurs interactions pour le poids de fruits.....	84
Tableau 31: Valeure moyenne du poids de fruits pour la combinaison des deux facteurs étudiés	84
Tableau 32: Analyse de la variance du rendement caculé de fruits.....	85
Tableau 33 : Analyse de signification à deux facteurs de l'effet de traitement antigel et partie traitée de la plante et leurs interactions pour le rendement en fruits	86
Tableau 34 : Valeure moyenne du rendement pour la combinaison des deux facteurs étudier	86

Introduction

L'agriculture joue un rôle crucial dans l'économie mondiale et la sécurité alimentaire. Elle emploie près d'un tiers de la population active mondiale et contribue significativement au PIB de nombreux pays, en particulier dans les régions en développement. La production agricole est essentielle pour nourrir une population mondiale croissante, qui devrait atteindre 9,7 milliards d'habitants d'ici 2050. Cependant, le secteur agricole fait face à des défis majeurs, notamment les changements climatiques, qui menacent les rendements et la durabilité à long terme (FAO, 2021).

Parmi les risques climatiques affectant l'agriculture, le gel est particulièrement dévastateur. A l'échelle mondiale, les dommages causés par le gel entraînent des pertes annuelles estimées à plusieurs milliards de dollars (Eberhard et Joachim, 2018). En Algérie, les épisodes de gel tardif au printemps ont régulièrement un impact négatif sur les cultures fruitières et maraîchères, compromettant les moyens de subsistance des agriculteurs et la sécurité alimentaire nationale. Les régions montagneuses et les hauts plateaux sont particulièrement vulnérables à ce phénomène.

Pour lutter contre les dégâts du gel, diverses solutions chimiques ont été développées, telles que les Cryo protecteurs et les régulateurs de croissance. Bien que ces produits offrent une certaine protection, ils présentent des inconvénients notables. Leur utilisation intensive peut avoir des effets néfastes sur l'environnement, notamment la pollution des sols et des eaux souterraines. De plus, la présence de résidus chimiques sur les cultures soulève des préoccupations en matière de sécurité alimentaire et de santé publique (Smith et al., 2022).

Face à ces défis, l'objectif de ce mémoire est de développer un produit bio-antigel innovant à base de matériaux naturels. Cette approche vise à offrir une alternative écologique et durable aux solutions chimiques conventionnelles. En utilisant des ingrédients d'origine naturelle, nous cherchons à minimiser l'impact environnemental tout en assurant une protection efficace des cultures contre le gel. Cette recherche s'inscrit dans une démarche plus large de développement de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement et adaptées aux défis du changement climatique.

En plus de cette première partie, assurée par les étudiants de Master 2, spécialité production végétale, du département des sciences agronomiques et portant sur la confection d'un bio-antigel, une deuxième partie est présentée par les étudiants du département d'électronique. Leur

contribution consiste à développer un appareil de pulvérisation de l'antigel à l'aide d'un dispositif électronique amélioré fonctionnant à distance.

Donc, ce travail sera présenté en deux grandes parties : (i) la partie agronomique, qui a pour objectif la confection d'un produit bio-antigel, et (ii) la partie électronique, qui vise à créer un dispositif électronique de traitement à distance. Les deux parties feront l'objet de deux brevets de création conformément à la législation en vigueur.

Ce travail rentre dans le cadre de la recherche et de développement, a pour but l'étude des besoins, en identifiant les exigences spécifiques pour un bio-antigel, comme la température de congélation, la toxicité et l'impact environnemental. La *sélection des ingrédients*, il faut choisir des composants naturels, tels que des extraits de plantes ou des substances organiques, qui peuvent abaisser le point de congélation de l'eau. La *formulation*, a concerné (i) le *mélange des ingrédients* (développer plusieurs formulations en combinant les ingrédients choisis). Cela peut inclure des tests préliminaires pour déterminer la proportion optimale de chaque composant. Et les *Tests de performance* : en évaluant l'efficacité de chaque formulation dans des conditions de congélation simulées. Les *tests et évaluation* : (i) *Tests en laboratoire*: soumettre le bio-antigel à des tests de performance pour mesurer son efficacité par rapport aux antigel traditionnels. Et (ii) *analyse de la sécurité*: vérifier la toxicité des ingrédients et s'assurer qu'ils ne nuisent pas à l'environnement. Les *optimisation* : (a) *affinage de la formule*: modifier la formulation en fonction des résultats des tests pour atteindre les performances souhaitées. Et (b) *Stabilité*: s'assurer que le produit reste stable sur une durée prolongée sans dégradation. La *validation* : (a) *tests sur le terrain*: appliquer le bio-antigel dans des situations réelles pour observer son efficacité et sa durabilité. Et (b) *collecte de données*: recueillir des retours d'expérience pour évaluer la satisfaction des utilisateurs et identifier d'éventuels problèmes. La *commercialisation* : (a) *Brevets et réglementation*: protéger la formulation par des brevets et s'assurer qu'elle respecte les réglementations en vigueur. (b) *Stratégie de mise sur le marché*: élaborer un plan pour commercialiser le bio-antigel, en ciblant les segments de marché appropriés. Et enfin, le *suivi et amélioration* : là, il est nécessaire que ce travail soit poursuivi par d'autres recherche par (a) *Retour d'expérience*: continuer à surveiller les performances du produit sur le marché et recueillir les avis des utilisateurs pour d'éventuelles améliorations futures.

Ce processus itératif permet de créer un produit efficace et respectueux de l'environnement, tout en répondant aux besoins des utilisateurs.

Première Partie : Volet Agronomique

Partie I : Synthèse Bibliographique

Première Partie : Volet Agronomique

Partie I : Synthèse Bibliographique

Chapitre 01 : Généralités sur le gel et les méthodes de protection

1.1. Définitions du gel

Le gel peut être considéré comme une condition climatique ou même un danger, avec de multiples effets sur les humains (Webb et Snyder, 2013). Le gel, en tant que condition climatique, fait principalement référence à la formation de givre ou de gelée blanche accumulée à la surface dans des endroits où la température est appropriée et où l'ensoleillement est moindre. En fait, le givre implique une teinte blanche que l'on peut observer sur les objets recouverts (Nicolas R. Dalezios et George P. Petropoulos, 2017).

Le gel est un danger lié à des températures proches de 0°C. Par conséquent, les plantes peuvent être endommagées par le refroidissement, mais pas nécessairement par le gel ou la gelée blanche. De manière générale, le gel est un symptôme de conditions climatiques dans lesquelles les températures chutent à des niveaux glaciaux, par rayonnement ou advection. Il est clair que le gel est quantitativement fonction de la température.

Le terme "gel" est largement utilisé pour décrire une situation dans laquelle les plantes subissent des dommages causés par le froid. Plus précisément, le terme "givre" fait référence à la formation de cristaux de glace sur les surfaces par congélation de la rosée ou par changement de phase de la vapeur d'eau en glace (Blanc et *al.* 1963).

Il existe plusieurs définitions du gel, telles que :

- a. Le gel se produit lorsque la température de surface est inférieure à 0°C et que la température de l'air est basse, ce qui peut endommager ou tuer les plantes (Ventskevich, 1958).
- b. Selon Tamis Stevenson, le gel se produit lorsque la température mesurée est inférieure ou égale à 0°C, les hauteurs de protection variant de 1,25 à 2,0 m (Hogg, 1971).
- c. Le gel se produit lorsque la température de l'air est proche de la température du sol et que la température de surface descend en dessous de 0°C (Kalma et *al.* 1992). Le gel se produit lorsque des périodes plus longues sont atteintes dans cette zone, l'air restant en dessous du point de congélation (0°C) pendant une période de temps suffisante, généralement 1 ou 2 jours.

d. Snyder et Paulo de Melo Abreu (2005) définissent le gel, principalement dans les zones tropicales, comme la situation où une grande surface d'air reste sous le point de congélation. Lors d'un épisode de gel, l'eau des plantes peut geler ou non, entraînant une congélation intracellulaire ou extracellulaire. La congélation intracellulaire est immédiatement mortelle, tandis que la congélation extracellulaire cause des dommages. L'étendue des dommages dépend de la résistance de la plante.

Le gel est associé à une température critique en dessous de laquelle les cellules fonctionnent mal ou meurent (Dalezios et Petropoulos, 2017).

1.2 Classification du gel

Le gel est généralement classé en fonction de la température selon certains critères. Différents types peuvent être divisés (Kalma et *al.* 1992) et peuvent être résumés comme suit :

1.2.1. Critères de formation du gel

Selon les critères de formation du gel, celui-ci est divisé en givre de rayonnement et givre d'advection, qui sont causés par des situations météorologiques particulières. Le gel par rayonnement est le résultat d'un refroidissement intense de la surface terrestre durant la nuit, associé à des vents calmes et à des systèmes de haute pression sans nuages. Plus précisément, le givre radiatif est causé par un fort rayonnement infrarouge, qui provoque un refroidissement de la surface de la Terre par perte d'énergie durant une nuit claire et calme. Ce type de gel se caractérise généralement par une inversion de température, des nuits claires et calmes, ainsi que des températures diurnes souvent supérieures à 0°C (Dalezios et Petropoulos, 2017). Une caractéristique du gel par rayonnement est souvent une inversion de température, ce qui signifie que la température moyenne à environ 15 m au-dessus du sol est généralement 4°C à 5°C plus élevée que la température de surface correspondante.



Figure 01: caractéristiques du gel d'advection (Hannan, 2019)

1.2.2. Critères du gel total ou partiel

Sur la base de la durée, le gel est caractérisé comme gel total lorsque la température maximale journalière est égale ou inférieure à 0°C , et gel partiel lorsque la température minimale journalière est inférieure ou égale à 0°C . Si le gel total dure plusieurs jours consécutifs, cela peut avoir des conséquences catastrophiques, car dans de tels cas, le gel pénètre dans le sol, entraînant la destruction des graines et des racines. En général, le type de gel le plus courant est le gel partiel, qui est également dommageable, en particulier lorsqu'il se produit au printemps, lorsque les plantes sont en pleine croissance (Dalezios et Petropoulos, 2017).

1.2.3. Critères de gel de l'humidité

l'humidité atmosphérique est une autre manifestation du gel, qui peut se produire lorsque la condensation de l'eau atmosphérique forme de la glace à la surface des objets, en plus de la baisse de la température en dessous de 0°C . Ce type de gel est appelé givre blanc. D'autre part, lorsqu'il n'y a pas de condensation avec la baisse de température en dessous de 0°C , alors ce type de gel est appelé givre noir (Dalezios et Petropoulos, 2017).

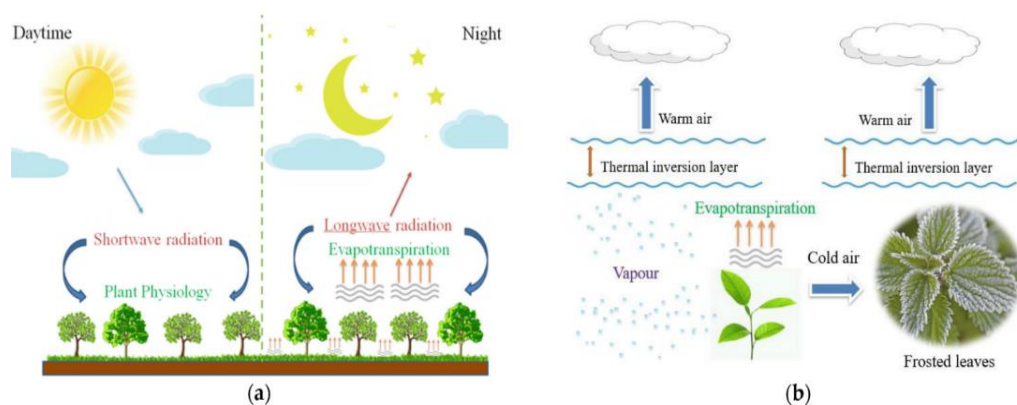


Figure 02:schéma de principe du givrage de la surface de la plante dans des conditions naturelles de rayonnement : (a) conditions naturelles de formation de givre par rayonnement ; (b) principe de la formation de givre a la surface de la plante (Huangsongal., 2021).

1.2.4. Critères de sévérité du gel

Le gel est classé en fonction du critère de gravité en gel léger lorsque la température varie entre 0°C et -4°C , gel modéré lorsque la température varie entre $-4,1^{\circ}\text{C}$ et -10°C , et gel sévère lorsque la température est inférieure à $-10,1^{\circ}\text{C}$ et moins (Dalezios et Petropoulos, 2017).

Même par temps venteux, il n'y a pas d'inversion thermique et la température peut être inférieure à 0°C pendant la journée.

Tableau 1 :Terminologie des événements de gel et caractéristiques typiques (FAO, 2005)

Type de givre	Caractéristiques
Rayonnement	Clair, calme, inversion, température supérieure à 0°C pendant la journée.
Advection	Vente, pas d'inversion, la température peut être inférieure à 0°C pendant la journée.

1.3 Évaluation géographique des dommages causés aux cultures par le gel

a- Cette carte représente la période «sans gel», c'est-à-dire le nombre de jours dans une année où la température reste au-dessus du point de congélation (0°C ou 32°F (fahrenheit)). Le dégradé de couleurs va du bleu terne (période sans gel plus courte) au rouge et au jaune (période sans gel plus longue).

Les régions tropicales et subtropicales, notamment en Amérique du Sud, en Amérique centrale, en Afrique, en Asie du Sud-Est et dans le nord de l'Australie, apparaissent en rouge et orange, indiquant une période sans gel de 300 jours ou plus tout au long de l'année.

Les régions subtropicales et tempérées, comme le sud des États-Unis, le sud de l'Europe, le sud de l'Amérique du Sud et certaines parties de l'Afrique australe et de l'Australie, sont délimitées en jaune et orange, ce qui correspond à une période sans gel d'environ 210 à 300 jours.

Des zones plus élevées en Amérique du Nord, en Europe et en Asie, ainsi que dans des régions montagneuses, apparaissent dans des tons de bleu, indiquant une période sans gel plus courte, souvent inférieure à 180 jours.

Les régions glaciaires et certaines régions de haute altitude, comme l'Himalaya et les Andes, sont colorées en bleu terne, ce qui témoigne d'une période sans gel de moins de 90 jours, voire d'une absence totale de conditions sans gel.

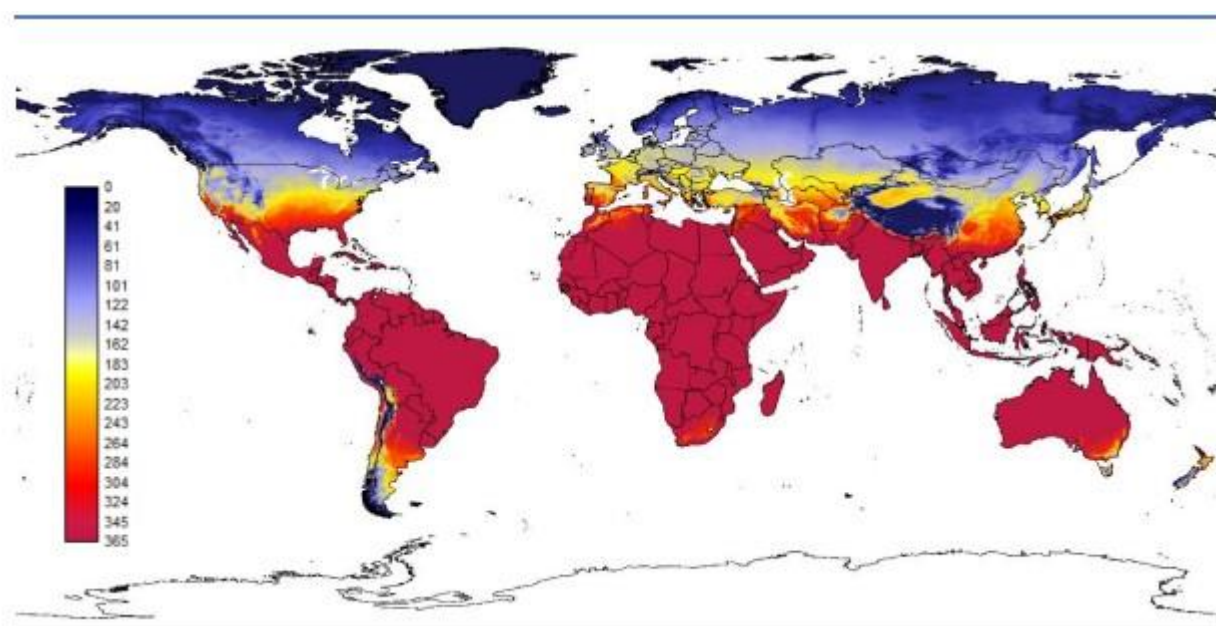


Figure 03 : période «sans gel», climat de 1981 à 2010 (Source : FAO et IIASA, 2021)

b- Cette carte montre le nombre annuel moyen de jours de gel sur divers districts du monde. Elle permet de trouver la valeur médiane de ce nombre sur la période de 1981 à 2010.

Le contour utilise une échelle de couleurs pour représenter le nombre de jours de gel, allant du bleu terne pour les zones avec le moins de jours de gel, au rouge/jaune pour les zones avec le plus grand nombre de jours de gel par an.

Les régions centrales et tropicales, qui comprennent la majeure partie de l'Amérique du Sud, de l'Amérique Centrale, de l'Afrique, de l'Asie du Sud-Est et du nord de l'Australie, sont en bleu terne, montrant exceptionnellement peu ou pas de jours de gel par an (moins de 20 jours en moyenne).

Les régions subtropicales et tempérées, telles que le sud de l'Amérique du Nord, le sud de l'Europe, le sud de l'Amérique du Sud et certaines parties de l'Afrique australe et de l'Australie, sont représentées dans des tons de vert et de jaune, indiquant un nombre modéré de jours de gel par an, s'étendant d'environ 20 à 180 jours.

Des régions plus élevées en Amérique du Nord, en Europe et en Asie, ainsi que des endroits escarpés comme l'Himalaya et les Andes, apparaissent dans des tons d'orange et de rouge, montrant un grand nombre de jours de gel par an, dépassant fréquemment 180 jours.

Les régions glaciaires et certaines zones de haute altitude, telles que le Groenland et certaines parties de l'Antarctique, sont colorées en rouge terne, ce qui correspond au nombre le plus élevé de jours de gel par an, probablement proche ou égal à l'ensemble de l'année (365 jours).

Le principal résultat mis en évidence par cette carte est le gradient latitudinal marqué dans la répartition des jours de gel à l'échelle mondiale. Les régions centrales et basses en latitude sont caractérisées par des saisons sans gel prolongées et de rares événements de gel, tandis que les régions plus élevées, en particulier dans l'hémisphère nord, connaissent des saisons de croissance plus courtes et un plus grand nombre d'épisodes de gel tout au long de l'année en raison de conditions climatiques plus froides.

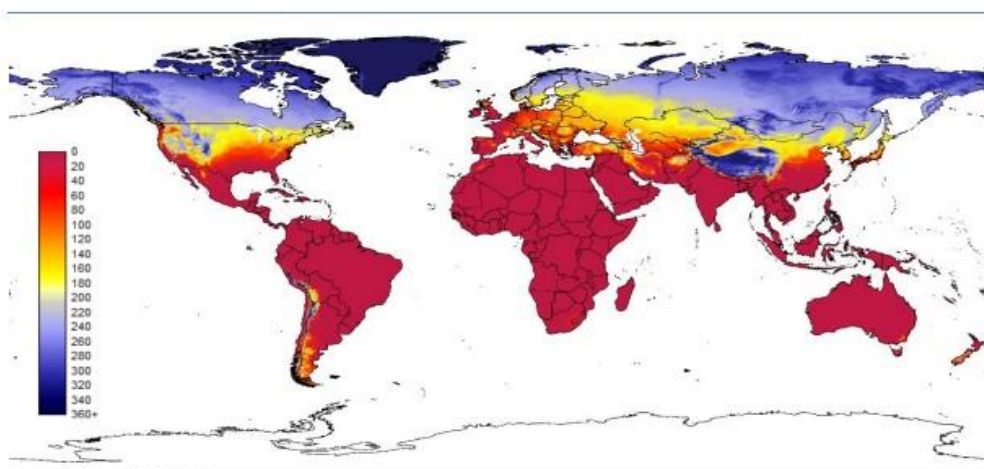


Figure 04: nombre annuel moyen de jours de gel, moyenne pour la période 1981-2010 (Source: FAO et IIASA, 2021)

1.4 Dommages causés par le gel : physiologiques, économiques et températures critiques

1.4.1 Lésions cellulaires

Les dommages directs dus au gel se produisent lorsque des cristaux de glace se forment à l'intérieur des cellules (gel intracellulaire), provoquant une perturbation mécanique de la structure cellulaire, l'étendue des dommages dépend principalement de la vitesse de refroidissement et du degré de surfusion avant le gel. Cependant, dans la nature, les dommages causés par le gel résultent généralement de la formation de cristaux de glace extracellulaires à l'extérieur des cellules. Cela conduit à la déshydratation (dessèchement) des cellules en raison de la différence de pression de vapeur entre la glace et l'eau liquide, entraînant une perte d'eau des cellules et une augmentation des concentrations de solutés. La principale cause des dégâts causés par le gel est ce stress hydrique secondaire et la déshydratation cellulaire résultant de la croissance de cristaux de glace extracellulaires. Il existe une relation étroite entre la sécheresse et la tolérance au gel, car les deux impliquent une tolérance à la déshydratation cellulaire, et il est peu probable que les antitranspirants offrent une protection contre le gel car la déshydratation est due à la formation de glace extracellulaire plutôt qu'à la transpiration (FAO, 2005).

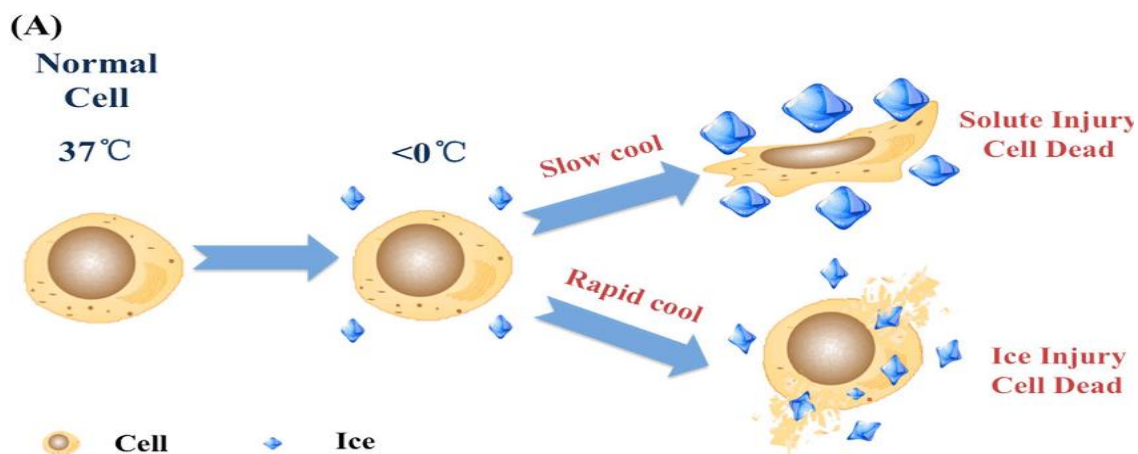


Figure 05 :(a) schéma de deux types de lésions cryogéniques dans le processus de congélation.
La structure moléculaire

1.4.2. Sensibilités des plantes

Les catégories de sensibilité au gel des plantes sont les suivantes: plantes tendres, légèrement rustiques, modérément rustiques et très rustiques (Levitt, 1980). Les plantes tendres, comme la

plupart des plantes tropicales, n'ont pas développé de mécanismes pour éviter la congélation intracellulaire. Les plantes légèrement rustiques comprennent les arbres fruitiers subtropicaux, les arbres à feuilles caduques pendant des périodes spécifiques et les cultures horticoles sensibles au gel jusqu'à environ -5°C . Les plantes modérément rustiques peuvent accumuler suffisamment de solutés pour résister aux dommages causés par le gel jusqu'à des températures aussi basses que -10°C en évitant les dommages causés par la déshydratation, mais sont moins tolérantes aux températures plus basses. Les plantes très rustiques peuvent empêcher la congélation intracellulaire et les dommages causés par la dessiccation cellulaire (FAO, 2005).

Bien que les catégories de sensibilité au gel fournissent des informations générales sur la tolérance au froid des organes des plantes avant que les dommages causés par le gel ne se produisent, des facteurs tels que le durcissement et le stade phonologique sont cruciaux. La température à laquelle 10 % et 90 % des bourgeons sont détruits varie au fur et à mesure que la saison avance des stades du début du gonflement jusqu'au stade post-floraison (FAO, 2005).

Wang et Wallace (2003) ont classé les fruits et légumes frais en fonction de leur sensibilité au gel, tandis que Caplan (1988) a regroupé les fleurs annuelles en fonction de leur tolérance au gel. De plus, une liste exhaustive de cultures et de leurs groupes de tolérance au gel peut être trouvée dans diverses sources, ce qui donne un aperçu de la façon dont les différentes plantes réagissent aux températures.

Tableau 2 : sensibilité des fruits et légumes frais aux dommages causés par le gel (Wang, & Wallace, 2003).

Plus susceptible	Modérément susceptible	Moins susceptible
Abricots	Pommes	Betteraves
Asperges	Brocoli	Choux de Bruxelles
Avocats	Carottes	Chou, mature et de Savoie
Bananes	Chou-fleur	Dattes
Haricots verts	Cèleri	Chou frise
Baies (sauf les canneberges)	Canneberges	Chou-rave
Concombres	Pamplemousses	Panais
Aubergines	Raisins	Rutabagas
Citrons	Oignon (sec)	Salsifis

Laitue	Oranges	Navets
Citrons verts	Persil	
Gombo	Poires	
Pêche	Petits pois	
Poivrons doux	Radis	
Prunes	Épinards	
Pommes de terre	Courge, hiver	
Courgettes, courges d'été		
Patates douces		
Tomates		

1.4.3. Cultures annuelles et bisannuelles

Les effets secondaires des dommages causés aux cultures maraichères changent considérablement et peuvent parfois être confondus avec des dommages biotiques. Les espèces varient énormément dans leur résistance au gel, mais le haut niveau de résistance est généralement atteint lorsque les conditions naturelles permettent le durcissement pour exiger la mise en place. La composition variétale est souvent aussi importante que les espèces pour caractériser la résistance au gel, ce qui est remarquable lorsqu'il existe des types hivernaux et printaniers. De même, il existe un lien inverse entre la précocité d'une variété et sa résistance au gel (FAO, 2005).

Les essais sur le terrain sur les températures seuils de dommage pour les nouvelles cultures maraichères sont quelque peu limités, bien que les températures seuils de dommage puissent être un peu plus élevées que les températures seuils auxquelles on s'attend à ce que les dommages soient observés dans les conditions de champ (FAO, 2005).

Lors d'épisodes de gel extrême sans neige, les jeunes plantes et des semis de céréales d'hiver peuvent être endommagées, mais la récupération est possible si le plateau de tallage n'est pas affecté. Cependant, si ce plateau est endommagé, la destruction par le froid se produira (FAO, 2005).

Les symptômes des dommages par le gel pour les cultures maraîchères : (i) Petites tâches imbibées d'eau ou piquûres à la surface et (ii) Les tissus lésés apparaissent bronze ou gris et dégagent une odeur désagréable (Caplan, 1988).

Tableau 03:symptômes des dommages causés par le gel pour les cultures maraichères (Caplan, 1988).

Cultures	Symptômes
Artichaut	- l'épiderme se détache et forme des colques blanchâtres à brun clair. Lorsque ces cloques sont brisées, les tissus sous-jacents brunissent.
Asperge	- l'extrémité devient molle et foncée et le reste de la tige est imbibé d'eau. Les tiges dégelées deviennent molles.
Betterave	- Trempage externe et interneet parfois noircissement du tissu conducteur.
Brocoli	- Les plus jeunes fleurons au centre de la pomme sont les plus sensibles aux dommages dus au gel. Ils brunissent et dégagent une forte odeur.
Chou	- Les feuilles deviennent imbibées d'eau, translucides et molles. Lors du dégel, l'épiderme se sépare.
Carotte	- Aspect cloqué, avec des fissures irrégulières dans le sens de la longueur. L'intérieur s'imbibe d'eau et s'assombrit lors du dégel.
Chou-fleur	- La pomme devient brune et dégage une forte odeur désagréable lorsqu'elle est cuite.
Cèleri	- Les feuilles et les pétioles semblent flétris et imbibes d'eau lors du dégel. Les pétiolesgèlent plus facilement que les feuilles.
Ail	- Les gousses dégelées apparaissent jaunâtres, grisâtres et imbibées d'eau.
Laitue	- Cloquage des cellules mortes de l'épiderme, qui se sépare sur les feuilles externes, devenant beige avec une susceptibilité accrue aux dommages physiques et à la pourriture.
Oignon	- Les bulbes dégelés sont mous, sont jaunâtres, grisâtres et l'eau trempée en section transversale. Les dégâts sont souvent limités à des échelles individuelles.
Poivron	- Tissu mort, imbibe d'eau en partie ou sur toute la surface du péricarpe, avec des creux, un dessèchement et une pourriture qui suivent le dégel.
Pomme de terre	- Les dommages causés par le gel peuvent ne pas être visibles extérieurement, mais se manifestent par des tâches grises ou gris bleuâtre sous la peau. Les tubercules dégelés deviennent mous.
Radis	- Les tissus dégelés semblent translucides et les racines ramollissent et se déshydratent.

Patate douce	- Une décoloration brun jaunâtre de l'anneau vasculaire et un aspect vert jaunâtre imbibé d'eau des autres tissus. Les racines ramollissent et deviennent sujettes à la pourriture.
Tomate	- Imbibées d'eau et mous lors du dégel. Dans les fruits partiellement gelés, la limite entre les tissus sains et morts est nette, surtout dans les fruits verts.
Navet	- Petites tâches imbibées d'eau ou piquetage à la surface. Les tissus blessés semblent beige ou gris et dégagent une odeur désagréable.

Tableau 04 : seuil critique de températures (°C) pour les cultures de grains, de fourrage et d'ensilage (Ventskevich, 1958).

Culture	Germination	Floraison	Fructification
Blé de printemps	-9, -10	-1, -2	-2, -4
Avoine	-8, -9	-1, -2	-2, -4
Orge	-7, -8	-1, -2	-2, -4
Pois	-7, -8	-2, -3	-3, -4
Lentilles	-7, -8	-2, -3	-2, -4
Vesce commune	-7, -8	-2, -3	-2, -4
Coriandre	-8, -10	-2, -3	-3, -4
Pavots	-7, -10	-2, -3	-2, -3
Kok-sachiez	-8, -10	-3, -4	-3, -4
Lupin	-6, -8	-3, -4	-3, -4
Vesce de printemps	-6, -7	-3, -4	-2, -4
Haricots	-5, -6	-2, -3	-3, -4
Tournesol	-5, -6	-2, -3	-2, -3
Carthame	-4, -6	-2, -3	-3, -4
Moutarde blanche	-4, -6	-2, -3	-3, -4
Lin	-5, -7	-2, -3	-2, -4
Chanvre	-5, -7	-2, -3	-2, -4
Betterave sucrière	-6, -7	-2, -3	-
Betterave fourragère	-6, -7	-	-
Carotte	-6, -7	-	-
Navet	-6, -7	-	-
Chou	-5, -7	-2, -3	-6, -9
Soja	-3, -4	-2, -3	-2, -3
Millet italien	-3, -4	-1, -2	-2, -3
Lupin jaune européen	-4, -5	-2, -3	-
Maïs	-2, -3	-1, -2	-2, -3
Millet	-2, -3	-1, -2	-2, -3
Herbe du soudan	-2, -3	-1, -2	-2, -3
Sorgho	-2, -3	-1, -2	-2, -3

Pomme de terre	-2, -3	-1, -2	-1, -2
Tabac rustique	-2, -3	-	-2, -3
Sarrasin	-1, -2	-1, -2	-0.5, -2
Ricin	-1, -1.5	-0.5, -1	-2
Coton	-1, -2	-1, -2	-2, -3
Melons	-0.5, -1	-0.5, -1	-1
Riz	-0.5, -1	-0.5, -1	-0.5, -1
Sésame	-0.5, -1	-0.5, -1	-
Guimauve a fibres	-0.5, -1	-	-
Arachide	-0.5, -1	-	-
Concombre	-0.5, -1	-	-
Tomate	0, -1	0, -1	0, -1
Tabac	0, -1	0, -1	0, -1

1.4.4. Cultures pérennes

Les limites de la distribution naturelle de nombreuses plantes, y compris certains arbres fruitiers à feuilles caduques, sont liés à la température minimale à laquelle la surfusion peut se produire (c'est-à-dire le point de nucléation homogène), qui est proche de -40°C . Sous le point de nucléation homogène, le gel est intracellulaire et mortel (Burke et Coll., 1976 ; Weiser et Coll., 1979 ; Ikeda, 1982).

1.4.5. Arbres fruitiers

Les arbres fruitiers à feuilles caduques sont plus sensibles aux températures gélives pendant la floraison et les premiers stades de développement des fruits, la sensibilité augmentant au fur et à mesure que les stades phénologiques progressent depuis la première floraison jusqu'aux stades de petits fruits ou de noix. L'étendue des dommages est influencée par des facteurs tels que l'exposition récente à la température, les plantes étant plus sensibles lorsque le temps chaud précède un épisode de gel (Burke et *al.*, 1976).

Des dommages causés par le gel hivernal peuvent également survenir, affectant l'écorce, les tissus ligneux et les bourgeons dormants, le degré de dommage variant en fonction de la rusticité et des températures extrêmes (Myers, 1988).

Les températures critiques pour différentes variétés de cultures et stades phénologiques ont été établies grâce à des observations sur le terrain et à des études contrôlées, bien que les températures critiques mesurées sur le terrain aient tendance à être légèrement supérieures à

celles des environnements contrôlés en raison de facteurs tels que les variations de température des bourgeons ou des tissus (FAO, 2005).

1.4.6. Les dommages économiques causés par le gel

Divers pays sont confrontés à des pertes économiques importantes attribuées aux dommages causés par le gel, plus que tout autre phénomène météorologique. Aux Etats-Unis, le gel des récoltes entraîne plus de pertes économiques que tout autre aléa météorologique, avec des exemples comme la dévastation de l'industrie des agrumes en Floride et des pertes importantes de fruits en Californie. Les épisodes de gel ont causé des milliards de dollars de dégâts, affectant non seulement les agriculteurs, mais aussi les économies locales en raison du chômage et de la réduction de la circulation de l'argent. L'impact économique des dommages causés par le gel va au-delà des pertes directes de récoltes, affectant les moyens de subsistance, la sécurité alimentaire et les économies locales.

Les efforts visant à atténuer les dommages causés par le gel font appel à diverses méthodes de protection, notamment la sélection du site, la gestion du drainage de l'air froid, la sélection des plantes, l'élagage, les couvertures végétales, l'irrigation du sol et l'utilisation de chauffages, d'asperseurs, d'éoliennes et d'autres techniques innovantes. Malgré les progrès réalisés dans les méthodes de protection contre le gel, les approches existantes ont des limites et des coûts, ce qui incite à explorer de nouvelles technologies et de nouveaux outils pour améliorer la protection et minimiser les pertes économiques associées aux dommages causés par le gel (FAO, 2005).

Les effets économiques des dommages causés par le gel dans les pays peuvent être mesurés en termes de pertes financières subies. Par exemple, aux Etats-Unis, l'industrie des agrumes en Floride a subi des milliards de dollars de pertes en raison des dommages causés par le gel, tandis que la Californie a subi des pertes d'environ 500 millions de dollars en fruits lors d'un épisode de gel en décembre 1990. De même, le gel de décembre 1998 en Californie a causé environ 700 millions de dollars de dégâts. Ces pertes économiques n'affectent pas seulement les agriculteurs, mais ont également des effets secondaires sur les communautés locales et régionales, entraînant le chômage et une réduction de l'activité économique.

Le rapport coût-efficacité des méthodes de protection contre le gel dépend de facteurs tels que la fréquence des épisodes de gel, la valeur de la culture et le coût des méthodes de protection.

Des méthodes de protection passive et active contre le gel sont utilisées, les méthodes passives étant généralement plus facilement justifiées économiquement. L'impact économique des dommages causés par le gel souligne l'importance de stratégies d'atténuation efficaces pour minimiser les pertes financières et soutenir la durabilité de l'agriculture.

Les pertes économiques causées par le gel dans divers pays ont été importantes. Par exemple, en Espagne, la vague de froid a touché les céréales, entraînant des pertes globales d'environ 3,3 milliards d'euros, avec des pertes assurées d'environ 600 millions d'euros. L'Italie et la France ont enregistré les pertes les plus élevées, enregistrant chacune des pertes d'environ un milliard d'euros. Pour atténuer ces pertes, les pays ont mis en place des mécanismes d'assurance contre le gel, notamment une assurance contre le gel et une assurance de garantie de rendement, certains gouvernements subventionnant les primes d'assurance pour augmenter la couverture. Les pertes dues au gel printanier en 2017 ont mis en évidence l'ampleur potentielle de tels événements, d'autant plus que la période de végétation commence plus tôt en raison du changement climatique, ce qui pourrait entraîner une augmentation des pertes dans la culture fruitière et la viticulture dans le futur (Eberhard et Joachim, 2018).

1.5. Un apersu historique sur la protection contre le gel

Habituellement, les dommages causés par le gel dans les climats subtropicaux sont associés à des masses d'air froid modérées qui apporteront 2 à 4 nuits de températures inférieures à zéro (Bagdonas, Georg et Gerber, 1978). Dans les régions de l'est du continent, les épisodes de gel sont souvent liés à des phénomènes convectifs, avec des retours de froid soudains. Les épisodes de gel commencent souvent par une advection d'air froid suivie de quelques nuits de gel radiatif. Pour les arbres fruitiers à feuilles caduques et les arbres à noix, les périodes de gel préjudiciables produisent principalement au printemps, mais également parfois pendant la période de récolte. Pour les cultures subtropicales, les dommages se produisent généralement en hiver. Ainsi, lorsque les cultures tropicales sont affectées par le froid, la température est généralement supérieure à zéro. Dans les climats tempérés, les cultures céréalières peuvent également être endommagées lors de gelées tardives ou même de gelées douces. Pour les agriculteurs céréaliers, la réaction la plus fréquente est de planter des cultures ou des variétés moins vulnérables aux dommages (par exemple, planter du blé de printemps au lieu du blé d'hiver), ou d'éviter de cultiver des espèces sensibles dans les zones à risque élevé de gel.

De plus, lorsque des températures inférieures à zéro se produiraient régulièrement, les cultures subtropicales sont préférentiellement développées dans des régions présentant moins de risques (FAO, 2005).

Un bon exemple de ce phénomène est le déplacement de la production d'agrumes vers le sud de la Floride, en réaction à quelques épisodes de gel sévères survenus dans les années 1980 et 1990 (Attaway, 1997).

De même, de nombreuses cultures de fruits à feuilles caduques et de noix ont tendance à être développées dans les climats méditerranéens, car la probabilité de pertes dues aux dommages par le gel y est moindre que dans les climats plus continentaux. La recherche de la protection contre le gel s'est surtout développée en réponse à des dommages irréguliers dans des climats modérément favorables. Lorsque les dommages surviennent fréquemment, la meilleure solution est de déplacer la culture dans une zone plus favorable (FAO, 2005). Attaway (1997) a ainsi noté qu'avant 1835, les orangers étaient couramment cultivés en Caroline du Sud, en Géorgie et dans le nord de la Floride, où les risques de dommages par le gel, auraient aujourd'hui dissuadé toute production commerciale d'oranges.

De nos jours, la production de cultures subtropicales ne serait pas envisagée dans ces zones. Attaway (1997) souligne que ses observations s'appuient davantage sur les témoignages des producteurs que sur des données climatologiques, mais des périodes de gel moins dommageables ont dû se produire entre les XVIII^e et XIX^e siècles permettre le développement de ces cultures subtropicales, là où elles ne seraient plus viables aujourd'hui.

L'historique des dommages causés par le gel est plus dispersé dans le climat méditerranéen de Californie. Récemment, la Californie a connu deux épisodes de gel majeurs dans l'industrie des agrumes, celui de 1990 ayant causé les plus importants dommages depuis les gels de 1913 et 1937 (Attaway, 1997).

Malgré l'ampleur des dommages aux cultures, Attaway (1997) a noté que "la plupart des arbres étaient en assez bon état, ayant enduré des températures qui auraient massacré des arbres en Floride". Le gel de décembre 2000 a illustré la capacité de résistance des arbres acclimatés aux conditions de Californie. Les arbres moins bien acclimatés sont en effet plus vulnérables aux dommages par le gel que ceux exposés aux deux épisodes de gel californiens.

Enfin, Attaway (1997) a souligné la nature variable des dommages observés suite aux épisodes de gel.

1.6. Méthodes de protection contre le gel

Il existe de nombreuses méthodes de protection passives et active utilisées contre le gel, et nous n'en avons choisi que quelques-unes.

1.6.1 protection passive

1.6.1.1 Sélection et gestion du site

les agriculteurs sont généralement conscients que certaines zones sont plus sujettes aux dommages causés par le gel que d'autres. La première étape dans la sélection d'un site pour une nouvelle plantation consiste à discuter avec la population locale des cultures et des variétés appropriées pour la région. Les agriculteurs locaux et les conseillers techniques en vulgarisation ont souvent une bonne connaissance des endroits qui pourraient poser problème.

Généralement, les points bas de la topographie locale ont des températures plus froides et donc plus de risques de dégâts. Cependant, les dommages peuvent parfois survenir dans une partie d'une zone cultivée et pas dans une autre, sans différences topographiques apparentes. Dans certains cas, cela peut être dû à des différences dans le type de sol, qui peuvent affecter la conduction et le stockage de la chaleur dans le sol.

Les sols sableux secs transfèrent mieux la chaleur que les sols secs et argileux lourds, et transfèrent et stockent mieux la chaleur que les sols organiques (tourbe). Lorsque la teneur en eau est proche de la capacité du sol (c'est-à-dire un jour ou deux après avoir complètement mouillé le sol), les sols présentent les conditions les plus favorables au transfert et au stockage de la chaleur. Cependant, les sols organiques ont un mauvais transfert et un mauvais stockage de la chaleur, quelle que soit leur teneur en eau.

Lors de la sélection d'un site dans une région sujette au gel, il est donc préférable d'éviter des sols organiques. L'air froid étant plus dense que l'air chaud, il s'accumule dans les points bas, un peu comme l'eau lors d'une inondation. (FAO, 2005).

Par conséquent, il convient d'éviter de planter dans des zones basses et froides à moins que des méthodes de protection active adéquates et rentables ne soient incluses dans la stratégie de gestion à long terme. Ceci est important à la fois à l'échelle régionale et à l'échelle de l'exploitation. Par exemple, à l'échelle régionale, les fonds de vallées proches des rivières sont généralement plus froids que les pentes situées au-dessus. Ces points peuvent être identifiés à

partir de cartes topographiques, en collectant des données de température et en localisant les points où se forment en premier les brouillards au sol à basse altitude.(FAO,2005).

Les points bas ont constamment des nuits plus froides, lorsque le ciel est clair et le vent faible, tout au long de l'année. Ainsi, des mesures de température permettant d'identifier les points froids peuvent être effectuées à tout moment de l'année. La plantation de cultures à feuilles caduques sur des pentes exposées au soleil retarde la floraison printanière et offre souvent une protection. Il est préférable de planter les arbres subtropicaux sur des pentes exposées au soleil, où le sol et les cultures peuvent recevoir et stocker davantage d'énergie solaire directe (FAO, 2005).

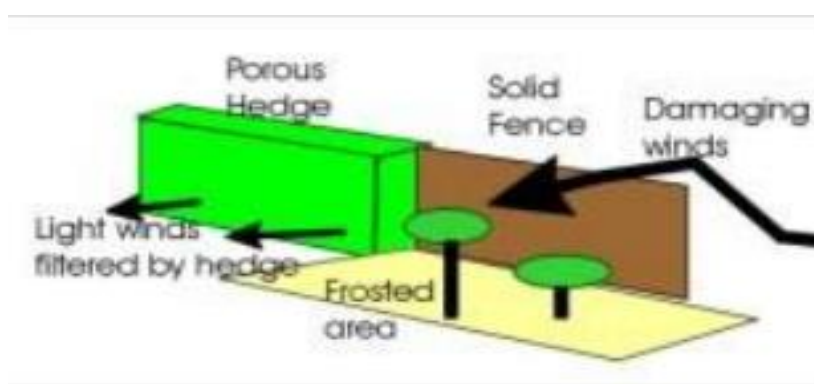


Figure 06 : critères de sélection du site (oliver, 2022)

1.6.1.2 Drainage de l'air froid

Les arbres, les buissons, les monticules de terre, les meules de foin et les clôtures peuvent être utilisés pour contrôler le flux d'air autour des zones agricoles, et leur placement approprié peut affecter le risque de dommages causés par le gel. Une étude approfondie des cartes topographiques peut souvent aider à prévenir des problèmes majeurs de dégâts dus au gel. De plus, l'utilisation de bombes fumigènes ou d'autres dispositifs générateurs de fumée pour étudier le flux d'air froid en aval la nuit peut être informative. Ces études doivent être réalisées les nuits présentant des conditions favorables au gel radiatif, mais pas nécessairement lorsque la température est inférieure à zéro.

Une fois que le schéma d'écoulement de l'air froid est connu, le placement approprié d'obstacles de dérivation peut fournir un degré élevé de protection. Si une culture existe déjà dans une zone sujette au gel, il existe plusieurs pratiques de gestion qui pourraient aider à réduire les risques de dommages. Tous les obstacles qui empêchent le drainage de l'air froid d'une culture vers le

bas de la pente doivent être éliminés. Ces obstacles peuvent être des haies, des clôtures, des bottes de foin ou une végétation dense située en aval du champ. Le nivellement du sol peut parfois améliorer le drainage de l'air froid à travers une culture, de sorte que l'air froid entrant continue de traverser la culture. Dans les vergers et les vignobles, les lignes de rangs doivent être orientées pour favoriser le drainage naturel de l'air froid hors de la culture.

Cependant, les avantages liés à l'orientation des rangs de cultures pour améliorer le drainage de l'air froid doivent être mis en balance avec les inconvénients potentiels, comme une érosion accrue et d'autres désavantages (FAO, 2005).

L'herbe et les résidus végétaux dans les zones situées en amont d'une culture peuvent rendre l'air plus froid et améliorer le drainage de l'air froid vers la culture. La température de l'air mesurée dans les vignobles et les vergers d'agrumes avec des résidus végétaux ou une couverture herbeuse est généralement entre 0 °C et 0,5 °C plus froide que dans les vignobles et les vergers d'agrumes avec sol nu, en fonction des conditions du sol et des conditions météorologiques. Sans la présence des cultures, les différences seraient probablement plus importantes. Par conséquent, avoir un sol nu en amont d'une culture entraînera généralement des températures de l'air plus élevées au-dessus du sol en amont et une probabilité moindre de drainage de l'air froid dans la culture (FAO, 2005).



Figure 07 : rinçage à l'air froid (Keith, 2005)

1.6.1.3. Couvertures végétales

Les couvertures végétales sont plus chaudes que le ciel clair et augmentent ainsi le rayonnement infrarouge descendant la nuit, ce qui diminue les pertes de chaleur radiative du sol. Des couvertures de paille amovibles et des matériaux techniques sont couramment utilisés. En raison des coûts de main-d'œuvre, cette stratégie est principalement utilisée sur de petites plantations de cultures basses qui ne nécessitent pas de structures de soutien importantes.

Parfois, des problèmes phytosanitaires surviennent en raison d'un manque de ventilation. Les films de polypropylène tissés et non tissés sont parfois utilisés pour protéger des cultures à haute valeur ajoutée. Le gain de température peut varier d'environ 1 °C à 5 °C en fonction de l'épaisseur du film. Le film blanc est parfois utilisé pour les pépinières, mais pas pour les cultures maraîchères ou les cultures naturelles.

Il a été observé que le fait de recouvrir principalement les vignes de films de polyéthylène foncé augmente la température du feuillage jusqu'à 1,5 °C. Cependant, dans l'ensemble, les films transparents sont plus viables (FAO, 2005).



Figure 08 : couvertures végétales (Oxana, 2023)

1.6.1.4. Sélection de plantes adaptées au gel

Il est important de choisir des plantes qui fleurissent tardivement pour réduire les risques de dommages dus au gel, et de sélectionner des plantes plus tolérantes au gel. Par exemple, les arbres fruitiers à feuilles caduques et les vignes ne subissent généralement pas de dommages dus au gel sur le tronc, des branches ou des bourgeons dormants, mais peuvent subir des dommages au fur et à mesure que les fleurs et les petits fruits ou noix se développent. La sélection de plantes à feuilles caduques dont le débourrement et la floraison sont plus tardifs offre une bonne protection, car la probabilité et le risque de dégâts dus au gel diminuent rapidement au printemps.

Pour les agrumes, il est préférable de sélectionner des variétés plus résistantes. Les citrons sont les moins tolérants au gel, suivis des citrons verts, des pamplemousses, des tangelos (est un groupe de cultivars d'agrumes provenant de l'hybridation d'un mandarinier, et d'un pomelo) et des oranges, qui sont les plus résistants. De plus, le porte-greffe trifolié orange est connu pour améliorer la tolérance au gel des agrumes par rapport à d'autres porte-greffes. Pour les cultures

annuelles en plein champ et en rangs, il est important de déterminer la date de plantation qui minimise le risque de températures inférieures à zéro (FAO, 2005).

Dans certains cas, les cultures en plein champ et en rangs ne sont pas plantées directement à l'extérieur, mais sont d'abord installées dans des environnements protégés, puis transplantées dans le champ une fois le risque de gel écarté. Si les températures glaciales ne peuvent être évitées, il est préférable de choisir des cultures plus tolérantes au gel.

Les méthodes passives de protection contre le gel, comme l'utilisation de paillis ou de couvertures, sont généralement moins coûteuses que les méthodes actives, et les avantages sont souvent suffisants pour éliminer le besoin d'une protection active (FAO, 2005).

1.6.2. Protection active

1.6.2.1. Appareils de chauffage

Les méthodes actives, comme l'utilisation de systèmes de chauffage, peuvent être nécessaires dans certains cas. Les vergers, par exemple, sont essentiels pour la protection contre le gel des arbres fruitiers, offrant une protection grâce au rayonnement direct et au mélange convectif de chaleur dans la couche d'inversion de l'air. Cependant, ces méthodes actives, comme les réchauffeurs à retour de fumée au fioul, sont recommandés à raison d'un pour 100 m² pour une protection efficace contre le gel peuvent présenter des défis, comme les émissions de polluants, les coûts de carburant et les efforts de maintenance.

Bien que les méthodes actives soient utilisées, des défis tels que les émissions de polluants, les coûts de carburant et les efforts de maintenance limitent leur déploiement. Les appareils de chauffage fonctionnent avec des combustibles solides, liquides ou gazeux, émettant de la fumée et des polluants comme le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂). La chaleur sensible qu'ils génèrent réchauffe l'air sans pour autant modifier sa teneur en humidité. La température de l'air à la sortie des chauffages utilisés dans les vergers varie généralement entre 635°C et 1 000°C, ce qui fait rapidement monter la température de l'air chauffé et le mélange à l'air plus frais, réchauffant ainsi l'environnement (figure 09). Les radiateurs générateurs de fumée peuvent réduire la visibilité, mais ont un impact limité sur la température du ciel. Les particules de fumée étant de petite taille, elles permettant le passage du rayonnement infrarouge sans absorption significative. De plus, les radiateurs mobiles, comme ceux utilisant

des réservoirs de propane, offrent flexibilité et efficacité en fournissant de la chaleur pour se protéger du gel (Alibayat, 2022), figure 10.

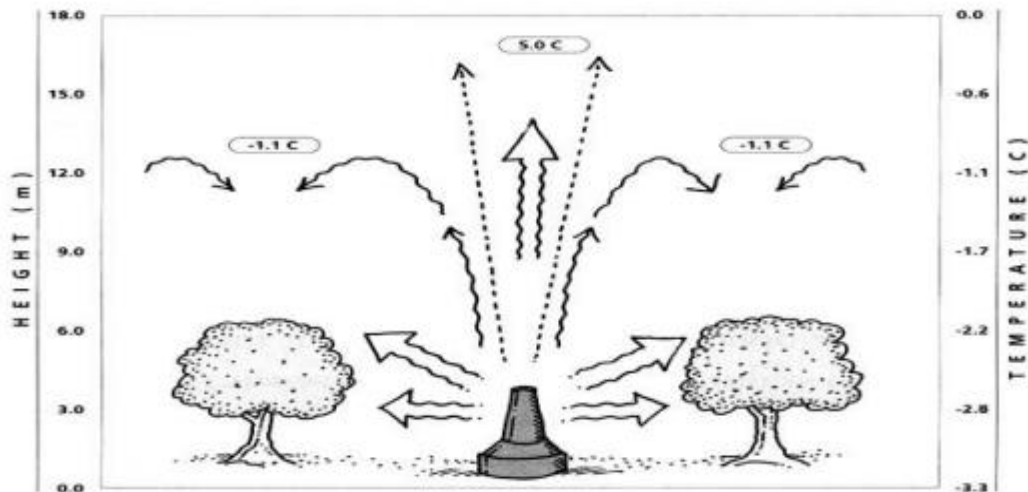


Figure 09: le changement de température dans l'environnement avec le mouvement vertical du flux d'air chaud sortant d'un appareil de chauffage (Snyder et Melo Abreu, 2005).



Figure 10 : appareils de chauffage (Alibayat, 2022)

1.6.2.2. Machines éoliennes

Les éoliennes (ou ventilateurs) qui fonctionnent (soufflent) presque à basse altitude ont été présentées en Californie dans les années 1920 comme un moyen de lutte contre le gel sur les cultures. Cependant, cette pratique n'a été largement adoptée qu'au cours des années 1940 et

1950. Aujourd'hui, les éoliennes sont largement utilisées dans de nombreuses régions du monde.

Les éoliennes sont utilisées sur une grande variété de cultures, notamment les vignes, les arbres à feuilles caduques et les agrumes. Les éoliennes sont particulièrement efficaces pour lutter contre le gel radiatif (Alibayat, 2022), figure 11.

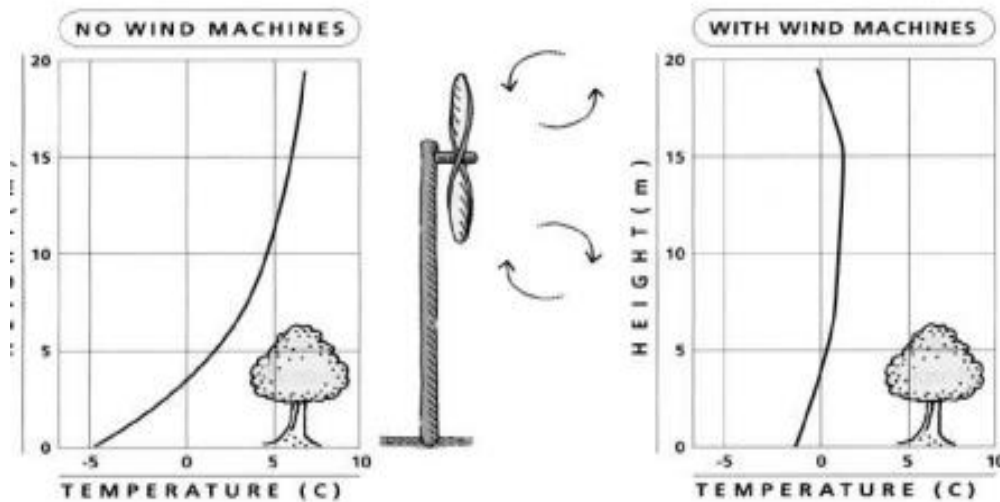


Figure 11 : variation de la température de l'air dans le sens vertical avec l'éolienne désactivée (a) et le démarrage (b) (Snyder et Melo Abreu, 2005).

1.6.2.3 Aspersions (Arroseurs)

L'utilisation de gicleurs/asperseurs pour la protection contre le gel présente un avantage par rapport à d'autres stratégies, car l'application d'eau est généralement moins coûteuse. De plus, la consommation d'énergie est nettement inférieure à celle utilisée pour la protection par chauffage (Alibayat, 2022), figure 12.



Figure 12 : exemple de protection contre le gel avec irrigation par aspersion (Ali bayat, 2022)

1.6.2.4. Protection chimique contre le gel

Deux méthodes chimiques de protection contre le gel sont couramment utilisées. La première consiste à appliquer des sprays à base de cuivre, qui tuent les bactéries génératrices du gel à la surface des feuilles. Ces bactéries, telles que *Pseudomonas syringae* peuvent initier la formation de glace à la surface des feuilles, entraînant des dommages causés par le gel à une température légèrement inférieure ou égale à 0 °C (Lindow et al., 1978). En théorie, l'élimination complète de ces bactéries des feuilles permettrait aux plantes de résister à la formation de glace et offrirait une certaine protection contre les dommages causés par le gel.

Cependant, dans le cadre d'expériences étroitement contrôlées, il a été démontré que l'application de produits à base de cuivre et d'autres sprays antibactériens entraînait une réduction significative des bactéries génératrices de glace sur les feuilles, mais il n'y avait pas de diminution correspondante de la formation de glace. Cela suggère que d'autres bactéries non génératrices de glace ou des composés bactériens présents provoquaient également la nucléation de la glace (Constantinidou et al., 1991).

En raison de la présence de sources non bactériennes de nucléation de la glace et de l'incapacité de tuer complètement les bactéries génératrices de glace sur le terrain, l'utilisation d'une protection chimique contre le gel a produit des résultats mitigés (Snyder et Melo-Abreu, 2005). D'autres produits chimiques couramment utilisés pour la protection contre le gel sont les antitranspirants. Lorsqu'ils sont appliqués sur les plantes, ils empêcheraient la formation de glace ou le dessèchement des feuilles lors d'un gel. Cependant, il existe peu d'informations basées sur la recherche sur l'utilisation de ces produits. Une expérience menée en Caroline du

Nord a montré qu'un antitranspirant couramment disponible n'avait aucun effet positif sur la protection contre le gel des tomates et des poivrons (Perry et *al.*, 1992).

Il est important de noter que les dommages causés par le gel aux plantes résultent de la formation de cristaux de glace qui rompent les membranes cellulaires, entraînant l'effondrement et la déshydratation interne des cellules, et non d'une perte d'eau par les stomates (Snyder et Melo-Abreu, 2005).

1.7 La situation de gel en Algérie

Dans cette partie et en raison du manque de données statistiques, ainsi que le manque pour ne pas dire l'absence d'études antérieures sur ce sujet, à savoir l'effet du gel sur les cultures, nous aborderons cela comme un point distinct traité dans le deuxième chapitre, partie expérimentale.

Chapitre 02 : Généralités sur la culture du piment

2.1. Historique et origine du piment

Le piment (*Capsicumfrutescens* L.) appartient à la famille des solanacées. Son nom dérive probablement de "*Capsa*", un terme latin désignant une boîte à livres en forme de fruit. La culture du piment est ancestrale ; on estime qu'il est originaire du Mexique ou d'Amérique du Sud. Déjà cultivé à Tehuacan, au Mexique, il y a 7500 ans avant J.-C., il était l'une des premières plantes domestiquées en Amérique du Sud il y a 7000 ans. Les piments étaient utilisés pour leurs propriétés médicinales, comme condiment ou légume. Ils ont été introduits en Europe à la fin du XVe siècle, après les voyages de Christophe Colomb. Découverts par les Espagnols à Saint-Domingue, les piments sont rapidement devenus "l'épice du pauvre". Aux XVIIe et XVIIIe siècles, les épices importées étaient coûteuses et un symbole de richesse. Le piment a donc remplacé le coûteux "poivre d'Inde". Initialement cultivé pour ses caractéristiques décoratives, le piment a ensuite été utilisé en médecine avant de gagner en popularité culinaire. Son adaptation facile a facilité sa propagation, notamment grâce à Magellan qui l'a introduit en Afrique et en Asie. Aujourd'hui, le piment est cultivé sur tous les continents. Il est vivace dans les régions tropicales et annuel dans les régions tempérées. La plus grande diversité de piments se trouve au Mexique, dans les Antilles et dans les Caraïbes (Djebbour et Kebala, 2017). En Afrique, particulièrement au Bénin, il est cultivé toute l'année mais nécessite une irrigation pendant la saison sèche. Son cycle de production dure entre 5 et 8 mois selon l'entretien et la variété, offrant aux producteurs des revenus substantiels.

Le Piment est très utilisé en médecine traditionnelle car il est riche en capsaïcine, son principe actif principal, en vitamines et en antioxydants, et est recommandé pour le traitement d'un certain nombre d'affections telles que la grippe, la rhinopharyngite et les rhumatismes. En raison de son effet sur la formation du mauvais cholestérol, il facilite la digestion et prévient les maladies cardiovasculaires. (Djebbour et Kebala, 2017)

2.2. Présentation de la filière des piments

Les piments jouissent d'une popularité mondiale et revêtent une importance économique significative. Dans ce point, nous examinerons la situation de la production de piments à l'échelle mondiale, nationale et régionale.

2.2.1. Situation des piments dans le monde

Selon Ouamane (2019), la culture des piments est désormais répandue sur tous les continents habités et se divise en deux catégories: le piment-légume et le piment-condiment transformé en poudre, mesurés en tonnes de matières sèches.

Les variétés les plus cultivées à l'échelle mondiale comprennent le Cayenne, le Gorria, le Tabasco, le Habanero, le Lipari, et la Corne de bœuf ou le Piment de Cayenne (Djebbour et Kebala, 2017).

La production totale de piments dans le monde se situait autour de 10 millions de tonnes. Ce chiffre inclut les piments frais et les piments séchés. Comme indiqué précédemment, la région asiatique a dominé cette production avec près de 80% de la production mondiale. La Chine est en tête de liste en produisant environ 16.1 millions de tonnes de piments en 2014 (statistiques mondiales, 2014). Pour mettre les choses en perspective, la Chine a produit environ 48% de la production mondiale totale cette année-là seulement. Par rapport au concurrent le plus proche, le Mexique, la Chine a produit au moins cinq fois la quantité produite par le Mexique, soit 2.7 millions de tonnes. La Turquie arrive troisième avec une production totale de 2.1 millions de tonnes, suivie de l'Indonésie, avec 2.1 millions de tonnes, puis de l'Inde avec 1.9 million de tonnes. Cela met en perspective à quel point l'Asie est dominante dans la production de piments. L'Inde est un cas particulier car 1.5% de ses 32 millions de tonnes produites était composé de piments séchés, ce qui la place en tête de la production mondiale de piments séchés (Tableau 5). L'Espagne et les États-Unis, avec respectivement une production de 1.1 million de tonnes et 0.9 million de tonnes, arrivent en sixième et septième positions. Le cas de l'Espagne ne devrait pas être alarmant en raison de son commerce et, de toute évidence, "de la nature épicée de sa cuisine vénérée et délicieuse" (Heidi Young, 2022).

Tableau 05: les meilleurs pays producteurs des piments en 2014, (source: Heidi Young, 2022 et Bouragaa, 2019)

Pays	Production en million de tonne	Année	Superficie (ha)	Production (t)
Chine	16 ,1	2011	9998	1690280
Mexique	2 ,7	2012	10389	181538 ,0
Turquie	2,1	2013	10284	2144550
Indonésie	1,9	2014	10239	2335502
Inde	1,5	2015	10589	247254,025
L'Espagne	1,1	2016	22336	598637
États-Unis	0,9	2017	21868	614922

2.2.2. Présentation de la filière des piments en Algérie

2.2.2.1. Variétés les plus cultivées en Algérie

Les principales variétés de piments cultivées en Algérie sont : l'Eternel, le Lipari, l'Italico, le Doux Marconi, le Doux d'Espagne (type doux), la Corne de chèvre, le Nour, le Foughal, et le Capel hot (type piquant) (Djebbour et Kebala, 2017).

2.2.2.2. Evolution de la production de piments en Algérie

En 2017, l'Algérie était classée en 6^e parmi les pays africains en termes de production de piments, avec une production de 614 922 tonnes et un rendement de 28,12 tonnes par hectare pour le piment frais. Cette production représentait 10,55% de la production totale de piments secs en Afrique (Tableau 6). Par ailleurs, la superficie consacrée à cette culture a également évolué, passant de 9 998 hectares en 2011 à 21 868 hectares en 2017. Le piment occupe ainsi une place importante dans l'économie agricole du pays, avec une concurrence significative par rapport aux autres produits agricoles (DSA, 2017 in Bouragaa, 2019).

Tableau 06: production africaine des piments frais et secs (source : FAO, 2019 in Bouragaa, 2019).

Pays	Piment frais			Piment sec		
	Production (t)	Rendements (t/ha)	Rang mondial (sur 117)	Production (t)	Rendements (t/ha)	Rang mondial (sur 117)
Afrique	254998			455150		
Nigeria	748559	7,6563	7	68980	1,7380	11
Egypte	623221	15,1832	8	55273	3,4251	12
Ghana	120382	8,8067	11	119804	7,7431	7
Tunisie	429000	20,7371	12	20747	2,5317	30
Algérie	614922	28,1197	13	11948	3,5905	28
Ethiopie	138191	2,17	22	115000	0,4	6
Cameron	65441	2,2892	6	44508	2,610	32
Réunion	-	-	-	886	8,7667	51

2.3. Description de la plante

2.3.1. Description et classification botanique

Le piment (*Capsicum annum* L.), selon Djebbour et Kebala (2017), est une plante dicotylédone qui appartient à la famille des Solanacées. Sa classification est la suivante (source : taxonomie du piment (Oumane, 2019)):

Regne	Plantae
Ordre	Phanérogames
Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiosperme
Classe	Dicotylédones
Sous classe	Gamopétales
Famille	Solalacées
Genre	Capsicum
Espèce	<i>Capsicum annum</i> L.

2.3.2. Description morphologique

Le fruit du piment est une baie plus ou moins charnue qui contient de nombreuses graines dans sa cavité intérieure. Ils poussent sur des plants qui peuvent atteindre environ 1,5 mètre de hauteur. Il existe près de 10 espèces de piments qui se présentent sous différentes formes, tailles, couleurs et saveurs (Djebbour et Kebala, 2017).

2.3.2.1 Appareil végétatif

2.3.2.1.1 Système racinaire

Le système racinaire du piment est pivotant, avec de nombreuses racines adventives sur l'axe hypocotylé (Oumane, 2019).



Figure 13: Système racinaire du piment (Badache, 2015)

2.3.2.1.2 Système aérien

La plante est herbacée et sa hauteur varie de 40 à 50 cm ou de 0,30 à plus de 1 mètre, selon les cultivars (Oumane, 2019).



Figure 14: plante du piment (Source: Francisco Jose 2018)

2.3.2.1.3 Feuilles du piment

Les feuilles du piment ont un long pétiole long et un limbe ovoïde ou lancéolé. Elles sont persistantes, entières, alternes et lancéolées, avec un sommet aigu (Oumane, 2019).



figure 15: Aspect de la feuille du piment (Badache, 2015)

2.3.2.1.4 Fleur

Les fleurs sont blanchâtres, dressées ou pendantes, situées à l'aisselle des feuilles, avec une à deux fleurs par nœud. Chaque fleur possède 6 sépales (les pièces vertes extérieures) et 6 pétales (les pièces blanches). On trouve 5 à 7 étamines (les organes mâles produisant le pollen) à l'intérieur de la fleur. Au centre se trouve l'ovaire (l'organe femelle) qui deviendra le fruit (le piment) après pollinisation.

Le piment est préférentiellement autogame, mais avec un taux d'allogamie (fécondation croisée) variant de 8 à 30% selon les cultivars (Oumane, 2019).



Figure16: Fleurs du piment (Badache, 2015)

2.3.2.1.5 Fruit du piment

Les fruits, comme illustré dans la figure 17, peuvent prendre différentes formes : allongée, flexueuse, coniques, globuleuse à 3 ou 4 loges (lisses ou flexueuse), sphérique ou plate et côtelée. Ils présentent une grande variété de formes et de couleurs.

À maturité, les couleurs dominantes sont le rouge et le jaune, mais les fruits peuvent présenter une plus grande diversité de couleurs avant cette phase.

Ces fruits peuvent contenir, en quantité variable, de la capsaïcine, ce qui leur confère une saveur épicées. La capsaïcine est un composé chimique qui donne leur saveur piquante aux piments et poivrons. La quantité de capsaïcine varie d'un fruit à l'autre, conférant des niveaux d'épicité différents.

Les fruits renferment également une quantité importante de vitamine C, un nutriment essentiel pour la santé. (Oumane, 2019).



Figure 17:Fruits du piment (Badache, 2015)

2.3.2.1.6 Graine

Les graines, comme illustré par la figure 18, sont nombreuses, arrondies, plates et blanchâtres. Elles ont une saveur piquante beaucoup plus prononcée que la chair du fruit. Les graines conservent leur pouvoir germinatif pendant 4 à 5 ans à température ambiante (Oumane, 2019).



Figure 18:Semences du piment (Badache, 2015)

2.3.2.1.7 Stades phénologiques

Le cycle végétatif de la culture du piment dure de 70 à 95 jours, selon les variétés de piment, les conditions de culture et le climat. C'est une plante annuelle qui renouvelle son cycle chaque année. Il suit plusieurs stades végétatifs, à savoir :

Stade 0 : Levée: les graines germent et les plantules émergent du sol, mettant en place les premières feuilles cotylédonaire.

Stade 1 : Les cotylédons sont étalés

Stade 2 : Deux feuilles étalées sur la tige principale

Stade 3 : Développement de davantage de feuilles étalées sur la tige.

Développement foliaire (Stades 1-3): les plants développent progressivement leurs feuilles, passant de 2 feuilles étalées à un feuillage de plus en plus dense sur la tige principale.

Stade 4 : Début de la floraison

Stade 5 : Floraison

Floraison (Stades 4-5) : les premières fleurs apparaissent sur la plante, marquant le début de la floraison. Cette phase est cruciale car elle conditionne la future production de fruits.

Stade 6 : Fructification (développement du fruit) : Une fois la floraison établie, les fruits commencent à se former et à se développer sur la plante. C'est la phase de production proprement dite.(Zitouni et Douar,2017).

Chacun de ces stades de développement a des besoins spécifiques en termes d'eau, d'ensoleillement, de température et de fertilisation pour permettre une croissance optimale du piment.

2.3.3 Exigences écologiques de la culture de piments

2.3.3.1 Sols

Selon Djebbour et Kebala (2017), les piments préfèrent les sols bien drainés, riches en matière organique et avec une bonne aération.

Les sols silico-argileux conviennent mieux aux cultures de primeur, tandis que les terres argilo-siliceuses sont préférables et plus adaptées aux cultures de saison.

Le pH idéal se situe entre 6,5 et 7, les piments étant moyennement tolérants à l'acidité.

2.3.3.2 Climat

Les plantes de piments ont besoin de chaleur et préfèrent les climats tempérés. Les températures optimales se situent entre 20 à 30 °C le jour et entre 15 à 20 °C la nuit. Elle nécessite également une exposition prolongée à la lumière.

2.3.3.3 Irrigation

L'humidité du sol appropriée se situe entre 80 et 85 %, tandis que l'humidité de l'air doit être comprise entre 60 à 70 %.

L'irrigation se fait à la raie ou au goutte-à-goutte, à raison de 4000 à 5000 m³/ha (doses et fréquences selon le stade végétatif et les conditions climatiques)

La plante est modérément tolérante à la salinité, avec un seuil de 1,92 à 3,2 g/l (3 à 5 mmhos/cm-1).

En résumé, les piments requièrent des conditions de culture spécifiques en termes de sol, de température, de luminosité et d'irrigation pour assurer un développement optimal.

2.4. Conduite de la culture

2.4.1 Mode de culture du piment en Algérie

En Algérie, une variation des conditions climatiques impose une grande diversité des modes de culture.

Tableau 08: Calendrier cultural du piment (source : Oumane .S 2019)

	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Culture primeur (Abris plastique)	←		→		←		→										
Culture de saison						←		→			←		→				
Culture d'arrière saison											↔			←		→	
Culture saharienne							←		→			←		→		→	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">Semis ←</div> <div style="text-align: center;">→ Récolte</div> </div>																

2.4.1.1 Préparation du sol

Un labour de 25 à 30 cm, suivi d'un passage à la herse et à la fraise rotative, est recommandé (Djebbour et Kebala, 2017).

2.4.1.2 Semis et plantation

Le semis en pépinière s'effectue sous serre ou en pots (de septembre à novembre).

La plantation: sous serre (de septembre à janvier) et en plein champ (d'avril à mai).

Les distances entre rangs sont de 0.90 à 1 m, et entre plants de 0.40 à 0.45 m

La densité est de 20 000 à 25 000 plants par hectare.

2.4.1.3 Fertilisation et irrigation

A. Fumure de fond

- **Fumure organique** : 30 à 35 tonnes par hectare.

- **Fumure minérale** :

- Azote (N) : 180 à 200 unités par hectare.

- Phosphore (P) : 80 à 100 unités par hectare.

- Potassium (K) : 200 à 250 unités par hectare.

B. Fumure de couverture (4 apports)

1er apport	40 unités de N avant floraison 30 unités de K 40 unités de N nouaison
2ème apport	60 unités de K 30 unités de N fructification
3ème apport	60 unités de K 20 unités de N
4ème apport	60 unités de K après 1er récolte

2.4.1.4 Protection phytosanitaire

Pucerons

Insecticide: Méthomyl, Deltaméthrine et Pyrimicarbe

Botrytis, Oïdium, Mildiou et Alternaria

Fongicide: Vinchlozoline, Hexaconazole et Mancozèbe

2. 4.1. 5 Maladies et ravageurs et méthodes de lutte

Tableau 09: principales maladies et ravageurs du piment et méthodes de lutt (source; Fondio et al., 2009)

Type de Maladie	Maladie	Agent	pathogène	Vecteur ou	Cause
Viroses	Mosaïque	<i>Cucumber Mo- saic Virus (CMV)</i>	Pucerons	Décoloration, tâches et malformation des feuilles et des fruits Nanisme des plantes	Maintenir une bordure (1 m de large) propre ou planter 2 rangées de maïs autour des champs. Traiter les vecteurs avec du diméthoate par exemple Callidim 400EC
	Panachure du piment	<i>Pepper Mottle Virus (PMV)</i>	Pucerons	Décoloration uniforme des feuilles	Utiliser les variétés tolérantes (cf tableau) 1) Traiter les vecteurs avec du diméthoate par exemple Callidim 400 EC
	Nécrose vira- le du piment	<i>Tomato Spotted Wilt Virus</i>	Thrips (<i>Thrips tabaci</i>)	Marbrure, décoloration et malformation des feuilles et fruits suivie de nécrose	Utiliser les variétés tolérantes (cf tableau) 1) Traiter les vecteurs avec du diméthoate par exemple Callidim 400EC
Maladies Fongiques	Alternariose	<i>Alternaria solani</i>	Semences non traitées aux fongicides	Taches marrons sur les fruits matures, puis nécro- se des taches	Détruire les débris au champ. En cas d'attaque, traiter la parcelle au mancozèbe, par exemple Ivory 80WP à raison de 35 g pour 100 m².
	Fusariose	<i>Fusarium oxysporum</i>	Semences non traitées aux fongicides	Jaunissement du feuillage, puis flétrissement de la plante	Détruire les débris au champ. Utiliser la variété tolérante PM17/04A Faire une rotation Culturelle
Bactériose	Flétrissemen t bactérien	<i>Ralstonia spp.</i>	Semences non traitées Eau d'irrigation	Flétrissement brutal de la plante, puis dessèche- ment	Utiliser la variété tolérante PM17/04A Choisir un sol drainant bien Faire une rotation culturale
Nématodes		<i>Meloïdogyne spp.</i>	Culture continue	Galle racinaire, mauvais développement de la plante (nanisme)	Faire une rotation culturale
Insectes	Chenilles de mouche du fruit <i>Ceratitis capitata</i>			Attaque des feuilles, bourgeons et fruits du piment Dégât occasionnel	Traiter à la deltaméthrine, par exemple Décis 15,5EC ou à la cyperméthrine, par exemple Cypercal 250EC

2.5 Récolte

Comme indiqué, les fruits des piments sont prêts à être récoltés 50 à 60 jours après la floraison.

Il est conseillé de détacher les fruits avec leurs pédoncules à la main, en tirant délicatement pour ne pas endommager la plante.

La récolte se fait une fois par semaine en évitant de blesser les plantes. La récolte s'étale généralement sur plusieurs mois, les fleurs et les fruits se formant de manière échelonnée.

Les variétés améliorées de l'AVRDC (Asian Vegetable Research and Development Center) produisent des rendements de 10 à 20 tonnes par hectare (Dhaliwal, 2008).

Après la récolte, les piments peuvent être conservés au frais (8-10°C) pendant 2-3 semaines.

Ils peuvent aussi être séchés, congelés ou transformés en conserves, sauces, etc. pour une conservation à plus long terme.

Partie II: Expérimentation

Partie II: Expérimentation

Chapitre 1 : Matériels et méthodes

1.1. Objectif de l'étude

On rappelle que les dégâts causés par les gel sont incontestables et provoquent souvent des dommages importants sur les cultures, notamment les cultures maraîchères à l'état juvénile. A cet effet, nous avons recouru, à travers cette étude à la confection d'un bio antigel issu exclusivement de matières naturelles. Cette approche vise à fournir une solution respectueuse de l'environnement pour protéger les plantes du gel. En utilisant des ingrédients naturels, on évite l'utilisation de produits chimiques potentiellement nocifs pour l'environnement et la santé humaine.

Ce bio antigel a pour but de protéger les jeunes plantes et l'ensemble de la culture contre les effets néfastes du gel, améliorant ainsi la qualité et augmentant la productivité des produits agricoles. De plus, ce produit cherche à établir un équilibre entre la préservation de l'environnement et la croissance économique de la production en utilisant des matériaux naturels favorisant l'agriculture durable, renforçant ainsi la durabilité environnementale et économique du secteur agricole. Lorsqu'il y a des gelées, les plantes, en particulier les jeunes plantes, sont très sensibles aux dommages causés par le froid. Le gel peut endommager les tissus végétaux, entraînant la mort des plantes ou réduisant leur rendement. C'est pourquoi il est essentiel de trouver des moyens de protéger les cultures contre ces effets néfastes.

L'objectif principal de ce bio antigel est de préserver la santé des jeunes plantes et de l'ensemble de la culture en les protégeant des effets néfastes du gel. En réduisant les dommages causés par le froid, on améliore la qualité des produits agricoles et on augmente leur productivité. Cela peut avoir un impact positif sur les revenus des agriculteurs et contribuer à la sécurité alimentaire.

En résumé, le développement d'un bio antigel à partir de matières naturelles vise à protéger les plantes du gel, améliorer la qualité et augmenter la productivité des produits agricoles, tout en préservant l'environnement et favorisant la durabilité du secteur agricole. C'est une approche prometteuse pour répondre aux défis posés par les conditions climatiques et assurer une agriculture plus résiliente et respectueuse de l'environnement.

1.2. Etablir une situation générale du froid en Algérie

Pour établir une situation générale du froid en Algérie, nous avons entrepris, dans un premier temps, une analyse climatique dans plusieurs wilayas du pays afin de déterminer la fréquence du gel et d'évaluer son impact sur les cultures. Cette évaluation a été réalisée dans deuxième temps à travers des enquêtes sur terrain, menées auprès des agriculteurs dans certaines wilayas considérées comme étant des régions maraîchères.

1.2.1. Evaluation du gel

Pour l'évaluation de l'effet du gel dans les différentes zones agroécologiques en Algérie, nous avons traité et analysé les données météorologiques des régions des hauts plateaux, des régions orientales, des wilayas du centre, et certaines régions de l'ouest, à savoir les wilayates: M'sila, Sétif, Batna, Constantine, Mostaganem, Tiaret, Tipaza et Blida. Le choix de ces régions s'explique par les variations climatiques, les régimes atmosphériques et les positions géographiques qu'elles représentent. Chaque wilaya possède des spécificités climatiques plus ou moins distinctes.

M'sila: située dans les hauts plateaux, M'sila a un climat semi-aride avec des étés chauds et secs et des hivers frais. Les précipitations sont relativement faibles.

Sétif: également située dans les hauts plateaux, Sétif a un climat continental avec des étés chauds et des hivers froids. Les précipitations sont modérées et réparties tout au long de l'année.

Batna: également située dans les hauts plateaux, Batna a un climat semi-aride avec des étés chauds et secs et des hivers froids. Les précipitations sont plus abondantes en hiver.

Constantine: située dans les hauts plateaux, Constantine a un climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les précipitations sont bien réparties tout au long de l'année.

Mostaganem: située sur la côte méditerranéenne, Mostaganem a un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les précipitations sont plus abondantes en hiver.

Tiaret: située dans les hauts plateaux, Tiaret a un climat semi-aride avec des étés chauds et secs et des hivers froids. Les précipitations sont relativement faibles.

Tipaza: située sur la côte méditerranéenne, Tipaza a un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les précipitations sont bien réparties tout au long de l'année.

Blida: située dans les hauts plateaux, Blida a un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les précipitations sont plus abondantes en hiver.

Il convient de noter que ces informations sont des généralisations et qu'il peut y avoir des variations locales à l'intérieur de chaque wilaya.

Cette étape a consisté à collecter les données sur les températures minimales dans ces wilayas sur une période de trois ans, de 2021 à 2023. Les calculs ont permis de déterminer les périodes et le nombre de jours de gel, ainsi que la date de fin du gel et période sans gel, en utilisant les formules de Tongli Wang et *al.*, (2011).

- Le nombre de jours sans gel : number of frost-free days (NFFD)

$$NFFD = \sum_{m=1}^{12} \{1 / [1 + 1.15 \times e^{[-0.4 \times T_{\min(m)}]]\} N_m$$

$$NFFD = 3.3144 + 1.0114 \times NFFD$$

$$\text{If } NFFD < 0 \text{ then } NFFD = 0,$$

- Le début de la période sans gel : beginning of the frost-free period (BFFP)

$$\begin{aligned} bFFP = & 124.9495 + T_{\min(4)} \times (-1.7581) + T_{\min(5)} \times (-11.87934) + T_{\min(6)} \times 2.09433 \\ & + T_{\min(4)}^2 \times (-0.3746) + T_{\min(4)}^3 \times 0.01482 + T_{\min(5)}^3 \times 0.06751 + T_{\min(4)}^4 \times 0.00123 \\ & + T_{\min(5)}^4 \times (-0.00266) + T_{r(4)} \times 5.21934 + T_{r(4)}^2 \times (-0.16101) \\ & + NFFD^3 \times (-7.19) \times 10^{-6} + NFFD^4 \times 5.976953 \times 10^{-8} \\ & + NFFD^5 \times (-1.2266) \times 10^{-10}. \end{aligned}$$

- La date de fin de gel : end of free Frost period (EFFP)

$$\begin{aligned} eFFP = & 231.6577 + T_{\min(9)} \times 8.87656 + T_{\min(6)}^2 \times (-0.05996) + T_{\min(7)}^2 \times (-0.0751) \\ & + T_{\min(10)}^2 \times 0.20123 + T_{\min(9)}^3 \times (-0.026) + T_{\min(7)}^4 \times 9.435 \times 10^{-5} \\ & + T_{\min(9)}^4 \times 6.7816 \times 10^{-4} + T_{\min(10)}^4 \times (-2.9319) \times 10^{-4} + NFFD^5 \times 7.94 \times 10^{-12}. \end{aligned}$$

- La période sans gel : frost-free period (FFP):

$$FFP = eFFP - bFFP.$$

Où : "tmin(m) est la température minimale moyenne pour le mois m."

$$Tr(4) = tmax(4) - tmin(4)$$

If NFFD < 0 then NFFD = 0,

If bFFP < 0, then bFFP = 0. For eFFP,

If eFFP > 365, then eFFP = 365. For FFP,

If FFP < 0, then FFP = 0. If FFP > 365, then FFP = 365,

Les jours où le gel s'est produit : NFP : 365- NNFD.

1.2.2 Enquetes auprès des agricultures.

Nous avons réalisé des enquêtes auprès des agriculteurs, à travers un questionnaire dans le but de mieux comprendre les effets du gel sur les cultures en Algérie, les cultures les plus touchées ainsi que les pertes agricoles et économiques causées par le gel. Ces enquêtes ont été menées au près de plusieurs agriculteurs dans les différentes régions du pays, notamment à Bouira, Tizi Ouzou, M'sila, Mostaganem et Tiaret.

1.2.3. Travail de Laboratoire

1.2.3.1. Confectionnement du produit

1.2.3.1.1. Première étape: Extraction des matières

La première étape consiste à rassembler la matière première soit par achat, soit par extraction à partir de produits naturels. Il convient de signaler que les matières premières utilisées sont entièrement naturelles.

1.2.3.1.2. Deuxième étape : Formulation

La formulation a été réalisée suivant le Protocol de manipulation, en respectant les règles chimiques. Différents mélanges homogènes ont permis la confection et l'obtention de trois formules distinctes, avec concentrations différentes, dans le but de déterminer la substance la plus active. La quantité de chaque formulation est d'un litre.

1.2.4. Expérimentation sur l'efficacité de l'antigel

1.2.4.1. Présentation de la région de M'sila et du Site expérimental de Boukhmissa

La wilaya de M'sila occupe une position centrale privilégiée dans le nord de l'Algérie. Elle se trouve dans la région des hauts plateaux du centre et couvre une superficie de 18 175 km². En raison de sa géographie, elle est principalement dédiée à l'agriculture et à l'élevage, avec une pluviométrie malheureusement faible et irrégulière, ne dépassant pas les 250 mm par an. Située dans une zone semi-aride, elle est bordée au nord-est par Bordj-Bou-Arréridj et Sétif, au nord-

ouest par Médea et Bouira, à l'est par la wilaya de Batna, à l'ouest par la wilaya de Djelfa, et au sud-est par la wilaya de Biskra (Bahri et Bouafia, 2016).

La région d'étude de "**Boukhmissa**" se situe dans la commune de M'sila, à une latitude de $35^{\circ}40'$ N et une longitude de $04^{\circ}30'$ E, à une altitude d'environ 500 mètres. Elle se trouve au nord du Chott et au sud des montagnes de Maadid, traversée par la route nationale n° 45. Cette zone est caractérisée par les hameaux situés le long de la rivière El-K'sob, avec une pente très douce d'environ 5% (figure 19).

La superficie totale de la région de Boukhmissa est de 213 hectares, avec une population de 4435 habitants, soit environ 20,8 habitants par hectare, répartis dans 469 habitations, ce qui correspond à environ 9,4 personnes par habitation.



Figure19:carte de la wilaya de M'sila par commune. (SiteGifex ; cartes du monde entier 2024)



Figure 20: situation et délimitation de la région d'étude (Google Earthe, 2023)

1.2.4.2. Caractéristiques du sol

Les sols les plus représentés dans la région de M'sila sont les sols profonds et peu profonds. Dans la zone aride supérieure, on trouve les sols profonds de type argileux, à forte capacité de rétention en eau.

Des analyses physiques et chimiques du sol de la région, effectuées par Gouaffi et Si Mohamed (2009) et par Bouzidi et Hadji (2012), portant sur le CaCO_3 , le pH KCl, le pH eau, la conductivité électrique (CE) et la matière organique, présentées dans le tableau, montrent que le sol est calcaire, avec un pH alcalin, désaturé et non salé. Le sol est de type équilibré (argilo-limono-sableux) avec une faible teneur en matière organique.

Les variations mensuelles de l'humidité relative sont généralement à l'inverse des températures. Elles reflètent le faible régime pluviométrique, avec un maximum observé en hiver et un minimum en été.

Les gelées automnales constituent une contrainte majeure pour la majorité des cultures, bien qu'elles soient moins intenses que les gelées hivernales. Elles surviennent à une époque où les fleurs et les petits fruits sont particulièrement sensibles aux basses températures.

La lumière intervient par son effet photopériodique sur l'induction de la production et par son intensité sur l'activité photosynthétique. Une photopériode courte est plus favorable à la production, tandis qu'une photopériode longue est plus favorable à la croissance végétative. Le maximum d'ensoleillement est enregistré au mois d'août (332 heures), et le minimum au mois de septembre (204 heures).

Tableau 10 : Résultats des analyses physicochimiques des échantillons de sols de la zone d'étude

Nature	Résultats
Humidité	9 %
Matière organique	0,9 %
pH eau	8,17
pH KCl	7,83
Calcaire totale	62,33 %
Conductivité électrique	0,03 mm hos/ cm

1.2.4.3. Caractéristiques climatiques

1.2.4.3.1 Températures

Selon la période de 2016 à 2024, la saison très chaude dure 2,9 mois, du juin à septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 33°C. Le mois le plus chaud de l'année à M'Sila est juillet, avec une température moyenne maximale de 38 °C et minimale de 23 °C.

La saison fraîche dure 3,9 mois, du 15 novembre au 12 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 19 °C. Le mois le plus froid de l'année à M'Sila est janvier, avec une température moyenne minimale de 3 °C et maximale de 14 °C. (source : WeatherSpark)

Tableau 11: Température moyenne maximale et minimale à M'Sila (°c) de la période (2016-2024)

	Jan	Fév	Mars	Aavr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Tmax	14	16	19	23	28	34	38	37	32	26	19	15
Tmoy	8	9	13	16	21	27	31	30	25	20	13	9
Tmin	3	4	7	10	14	19	23	23	19	14	8	5

1.2.4.3.2. Précipitation

Pour montrer les variations mensuelles des précipitations et pas seulement les totaux mensuels, nous présentons l'accumulation de pluie sur une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. M'Sila connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles.

La période pluvieuse de l'année dure 9,8 mois, du 22 août au 14 juin, avec une pluviométrie d'au moins 13 millimètres sur une période glissante de 31 jours. Le mois le plus pluvieux à M'Sila est avril, avec une pluviométrie moyenne de 35 millimètres.

La période sèche de l'année dure 2,2 mois, du 14 juin au 22 août. Le mois le moins pluvieux à M'Sila est juillet, avec une pluviométrie moyenne de 4 millimètres (Source : WeatherSpark, 2024).

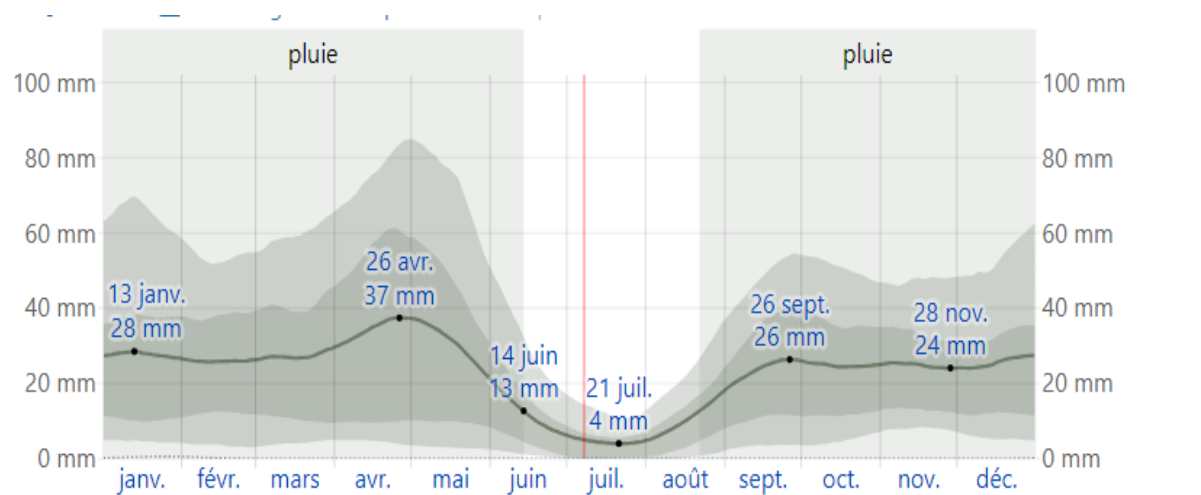


Figure 21 : courbe pluviométrique dans la région de M'Sila (Source:WeatherSpark, 2024).

Tableau 12 : Pluviométrie mensuelle moyenne à M'Sila (en mm) (2016-2024) .weatherspark (2024)

	Jan	Fév	Mars	Avri	Mai	Juan	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Pluis	28,0	25,8	26,8	34,8	31,8	11,9	4,2	10,0	24,4	24,4	25,1	25,6

1.2.5. Dispositif expérimental

Le protocole expérimental a porté sur l'étude de deux facteurs; le premier facteur (F1) est l'antigel, qui comporte quatre niveaux: *T4*sans antigel "*T*", *T1 avec* antigel "*A*", *T2 avec* antigel "*B*" et *T3 avec* antigel "*C*". Le deuxième facteur (F2) cconcerne la partie traitée de la plante, qui comporte trois niveaux:*P1* pour les tiges, *P2* pour les feuilles et *P3* pour la plante entière. L'expérience a été menée sur la culture de piments. Le dispositif expérimental utilisé était une randomisation toutal, comme le montre la figure 22. Les combinaisons entre les facteurs ont permis d'obtenir 36 traitements; [F1 x F2 x 3 répétitions].

P1T2	P3T3	P3T4	P3T3	P1T4	P1T1	P3T4	P3T2	P1T1	P2T4	P2T3	P2T2
P3T1	P3T2	P2T4	P2T3	P2T4	P1T4	P2T3	P3T1	P3T2	P1T2	P3T4	P1T3
P1T4	P3T1	P1T2	P1T1	P2T1	P2T1	P3T3	P2T2	P2T2	P1T3	P1T3	P2T1

Figure 22: dispositif expérimental

1.2.6. Traitements au froid

Les plants de piments ont été traités selon le dispositif expérimental, avec les quatre formules d'antigel appliquées sur les trois parties des plantes. Ensuite, ils ont été placés directement dans une chambre froide selon un traitement spécifique.

Le traitement au froid a été effectué dans l'entreprise FRIGOMEDIS pendant une semaine, dans des conditions optimales de gel, selon le processus suivant:

Tout d'abord, les plants ont été pulvérisés selon le dispositif expérimental, Ensuite, tous les plants traités ont été introduits (le 17 mars 2024) dans la chambre froide, disposés de la même manière expérimentale, dans des cagettes en plastique séparées (voir photo 23), Ils ont ensuite été placés dans des boîtes pour maintenir leur ordre. La température de la chambre froide a été réglée à 0°C (voir photo 24).

Le calendrier du traitement est le suivant :

- Premier jour: les plants ont été soumis au froid pendant 5 heures.
- Deuxième jour: les plants ont été soumis au froid pendant 6 heures.
- Troisième jour: les plants ont été soumis au froid pendant 7 heures.
- Quatrième jour: les plants ont restés dans la chambre pendant 24 heures.

À chaque intervalle, les plants ont été sortis de la chambre froide pour éviter le choc thermique causé par un changement brusque de température.



Photo originale 23: pulvérisation des plants juste avant le traitement au froid



Photo originale 24: réglage de la température de la chambre froide



Photo originale 25: la mise on place des traitements dans la chambre froide

1.2.7. Mise en place de la culture

La plantation sur le champ a été effectuée le cinquième jour après avoir sorti les plants de la chambre froide, suite à une période d'acclimatation dans le couloir afin d'éviter le choc thermique.

Les plants ont été plantés le 21 mars 2024, dans une exploitation agricole appartenant au secteur privé, chez Ismaël DAFAF, située dans la région de Boukhmissa (cf. site expérimental). Il convient de noter que la date de plantation a été très précoce par rapport à la date normale de plantation dans la région, en raison de températures minimales. La date normale de plantation dans la région se situe autour du 15 mai. L'écart entre la date de plantation et la date normale de plantation s'élève à 45 jours. L'âge des plantes était de 21 jours. Et c'est de jeunes plants, ce qui a exposé notre plantation aux conditions climatiques défavorables et plus sévères comme les basses températures et les jours courts. L'âge de la plante est jugé trop jeune pour être cultivé en plein champ.

Des visites périodiques, du 21 mars jusqu'au 31 juillet 2024, ont été réalisées tous les 10 jours. Elles ont permis de suivre le rythme de croissance et de développement des plantes par traitement.



Photo originale 26: l'irrigation juste après la mise en place de la culture de piment par traitement

1.2.8. Paramètres suivis de la culture après la plantation dans le champ

- Longue de la tige: la longueur de la tige est mesurée à l'aide d'un mètre ruban (en cm), du collet jusqu'à l'extrémité de la partie aérienne.
- Nombre de feuilles: il représente le nombre de feuilles, trifoliées, élaborées par la plante.
- Nombre de tiges : un décompte a été effectué pour déterminer le nombre de tiges principales et de tiges secondaires de chaque plante.

- Poids de fruits par plante : les fruits récoltés sont pesés à l'aide d'une balance de précision.
- Rendement : le rendement par hectare est déterminé pour chaque traitement,
- Analyse statistiques: les résultats obtenus ont été analysés par une analyse de la variance à deux critères de classification, à l'aide du logiciel statistique STATBOX version 4.6, Le seuil de signification retenu est de 5%. Les moyennes sont comparées par la méthode Newman et Keuls, basée sur la plus petite amplitude significative.

Chapitre 2 : Résultats et discussion

2.1 Evaluation des épisodes de gel

2.1.1 Résultats des études climatiques

D'après l'analyse des données des épisodes de gel en Algérie, les résultats ont montré que le gel se produit en Algérie en janvier, février, fin novembre, décembre, et parfois au début du mois de mars.

Le gel se produit dans les hauts plateaux, les régions de l'est, de centre, et dans certaines régions de l'ouest. En revanche, il ne se produit pas dans la zone littorale et sub-littorale. Cette différence s'explique par l'altitude et les niveaux d'humidité spécifiques à chaque région. Le gel peut avoir plusieurs conséquences sur l'agriculture dans les régions touchées.

T'ableau 13: les résultats de l'analyse des épisodes du gel dans les wilayas les plus affectées.

Wilaya	Constantine					Batna				
Nature	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD
2021	291	336	44	18	347	230	314	84	51	314
2022	282	338	56	25	340	221	316	96	59	309
2023	281	342	61	28	337	275	326	51	55	310
Wilaya	Blida					Tipaza				
Nature	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD
2021	358	358	0	0	365	358	358	0	0	365
2022	351	351	0	0	365	351	351	0	0	365
2023	363	363	0	0	365	363	363	0	0	365
Wilaya	Tiaret					Mostaganem				
Nature	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD
2021	277	333	56	28	337	346	353	7	0	365
2022	272	338	66	31	334	346	357	12	5	360
2023	263	338	74	37	328	375	361	14	1	364
Wilaya	Msila					Setif				
Nature	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD	FFP	EFFP	BFFP	NFD	NFFD
2021	276	331	55	26	339	248	321	74	43	322
2022	296	340	44	14	351	243	325	82	43	322
2023	313	358	46	14	351	243	331	88	51	314

Légende : *FFP*: période sans gel (frost-free period), *EFFP*: date de fin de gel (end of free Frost period), *BFFP*: début de la période sans gel (beginning of the frost-free period), *NFD*: jours où le gel s'est produit, *NFFD*: (nombre de jours sans gel : number of frost-free days).

2.1.2 Résultats des enquêtes relatives à l'effet du gel dans quelques wilayas marichères

Il semble que le gel représente un défi important pour l'agriculture en Algérie, car il entraîne des pertes financières significatives pour les agriculteurs. Les températures extrêmement basses peuvent endommager les cultures et compromettre les récoltes. Diverses méthodes sont utilisées, pour minimiser ces pertes, notamment l'irrigation continue et la fertilisation.

L'irrigation continue consiste à fournir de l'eau régulièrement aux cultures, même pendant les périodes de gel, afin de maintenir une température plus stable et de protéger les plantes. La fertilisation, quant à elle, vise à renforcer la résistance des plantes face aux conditions climatiques défavorables, y compris le gel. Ces méthodes montrent donc que l'irrigation continue et la fertilisation peuvent avoir un effet positif sur la réduction des pertes liées au gel.

Cependant, l'efficacité de ces méthodes peut varier considérablement d'une région à l'autre et d'une culture à l'autre. Certaines régions, peut être en raison de leurs caractéristiques ou de leur climat spécifique, peuvent bénéficier davantage de l'irrigation continue et de la fertilisation pour réduire les pertes causées par le gel. Dans ces endroits, des résultats positifs ont été observés grâce à l'utilisation de ces méthodes. En revanche, dans d'autres régions, ces méthodes peuvent ne pas être aussi efficaces, en raison de conditions climatiques plus extrêmes, d'une variété de cultures moins adaptée ou des ressources limitées pour mettre en œuvre ces pratiques agricoles.

En conclusion, bien que l'irrigation continue et la fertilisation puissent avoir un effet positif sur la réduction des pertes causées par le gel en Algérie, leur efficacité dépend fortement des conditions locales. Il est essentiel d'adapter les stratégies de prévention du gel en fonction des particularités de chaque région et culture afin de maximiser leur impact et de minimiser les conséquences du gel sur l'agriculture algérienne. De fait, le gel représente un défi majeur pour l'agriculture algérienne, mais des solutions existent, comme l'irrigation continue et la fertilisation, dont l'efficacité varie selon les contextes locaux. Une approche adaptée à chaque région et culture semble nécessaire pour minimiser au mieux les conséquences du gel sur l'agriculture.

Tabule 14: les résultats des enquêtes chez quelques agriculteurs

Wilayas	Cultures affectées	Pertes de production (en %)	Pertes (en DA)	Méthodes de prévention	Efficacité des méthodes de prevention
Bouira	Laitue, Pomme de terre, Tomate	30 à 100%.	200.000 .à 600.000	Irrigation et usage d'engrais	Efficacité relative
Tizi-Ouzou	Courge, Haricot, Pomme de terre, Oignon, Tomate, Navet	75% à 100 %.	250000 à 400.000 DA.	Arrosage et abandon	Efficacité relative
M'sila	Tomate, Poivron, Navet, Fève, Blé, Orge, et Abricot, Citron, Pomme, Haricot et Laitue	8 % à 45%.	30.000 à 35.000DA	Irrigation et usage d'engrais	Efficacité relative
Mostaganem	Famille des cucurbitacées, agrumes, Pommé de terre et fève	50%	100 illions	Irrigation et usage d'engrais: MAP	Efficacité relative
Tiaret	Céréales et Légumineuse	20% à 60 %	50 millions à 100 millions	Eviter la saison de gel et cultiver dans des serres	Efficacité relative

2.2. Résultats sur la confection du produit

Après de nombreuses recherches effectuées de septembre 2023 jusqu'au Février 2024, nous avons déterminer les ingrédients compatibles et efficaces pour formuler le produit. Pour ce faire, nous avons collecté trois échantillons contenant différentes concentrations de ces ingrédients. Cela nous a permis d'identifier l'ingrédient le plus efficace de définir les concentrations appropriées pour ce produit.

2.2.1. Etape 1. Extraction et ou utilisation des matières premières à partir de produits naturels

2.2.1.1. Protocole d'extraction de la pectine (Javeria, 2020)

Préparation des écorces: les écorces d'orange sont d'abord découpées en très petits morceaux après avoir soigneusement retiré la partie albédo (la partie blanche).

Extraction initiale : dans un bécher, on verse 100 millilitres d'eau distillée sur une plaque chauffante magnétique, en maintenant un mélange continu tout au long du processus. On y

ajoute ensuite 25 grammes des écorces d'orange préalablement découpées. La proportion d'eau à respecter est de 100 millilitres pour 25 grammes d'écorces.

Dissolution: le mélange est continuellement remué jusqu'à ce que les écorces commencent à s'émietter et à se dissoudre partiellement dans l'eau, sous l'effet de l'acide (HCl ou H₂SO₄) contenu dans les écorces.

Addition d'éthanol : la solution est retirée du feu, et une quantité équivalente d'éthanol (100 millilitres) est ajoutée pour chaque 100 millilitres d'eau utilisée.

Temps de repos : le mélange est laissé à reposer pendant une durée d'une à deux heures.

Filtration : après le temps de repos, la solution est filtrée à travers un tissu à mailles fines pour obtenir la pectine.



Figure 27;Résultat de l'extraction de pectine

2.2.2. Formulation du produit (protocole de fabrication de l'antigel)

Préparation des Composants

Les quantités nécessaires de chaque composant sont pesées avec précision.

Préparation des huiles (huiles essentielles et huiles végétales) : les huiles naturelles sont mélangées séparément dans un bécher pour assurer une distribution uniforme.

Chauffage de l'eau : de l'eau distillée est chauffée à une température de 70°C sur une plaque chauffante magnétique, en maintenant un mélange continu tout au long du processus.

Incorporation des épaississants : les épaississants en poudre sont ajoutés à l'eau chauffée avec un remuage (brassage) continu jusqu'à dissolution complète.

Incorporation des huiles naturelles : les huiles mélangées sont ajoutées à la solution d'épaississants et d'eau, suivies d'une homogénéisation pour assurer une intégration et une répartition uniforme.

Ajout des agents gélifiants : les agents gélifiants sont ajoutés successivement à la solution, en mélangeant soigneusement après chaque ajout pour garantir leur dissolution complète.

Incorporation de l'agent épaississant supplémentaire : un agent épaississant supplémentaire est dissous dans une partie d'un liquide spécifique, puis ajouté au mélange principal.

Ajout de sirop : un sirop de sucre est ajouté au mélange pour améliorer les propriétés de la solution.

Homogénéisation : la solution est laissée à homogénéiser complètement pendant 5 heures pour garantir une répartition uniforme de tous les composants.

Filtration et refroidissement : la solution est filtrée pour éliminer les impuretés à l'aide d'un filtre fin. Elle est ensuite laissée à refroidir à température ambiante.

Conditionnement : la solution refroidie est transférée dans des bouteilles, qui sont ensuite enveloppées dans un matériau protecteur contre la lumière. Les bouteilles sont stockées au réfrigérateur jusqu'à leur utilisation.

Trois formulations d'antigel ont été développées : l'antigel A (T1), l'antigel B (T2) et l'antigel C (T3), photo 28



Photo 28: les antigels formulés (photo originale)

2.3 Résultats sur l'efficacité du produit

2.3.1 Caractéristiques morphologiques

2.3.1.1. Hauteur des tiges (HT en cm)

Les résultats de l'analyse de la variance ont montré une différence statistiquement très significative ($p < 0,001$) entre les traitements antigel appliqués en ce qui concerne la hauteur des tiges, avec un coefficient de variation de 14,47 % (tableau 15).

L'analyse des moyennes, effectuée à l'aide du test de comparaison de Newman-Keuls, a permis de distinguer deux groupes homogènes (A et B).

Tableau 15: Analyse de la variance pour la hauteur de tige

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Proba	E.T.	C.V.
Var.Totale	715,115	35	20,432				
Var.Facteur 1	4,383	2	2,191	0,373	0,69697		
Var.Facteur 2	559,918	3	186,639	31,805	0		
Var.Inter F1*2	9,978	6	1,663	0,283	0,93837		
Var.Residuelle 1	140,836	24	5,868			2,422	14,47%

L'analyse des moyennes a montré que la moyenne globale de la hauteur des tiges (HT) a été de 16,74 cm, avec un écart-type de 2,42 cm. Les différents traitements antigel se classent comme suit en termes de hauteur moyenne des tiges :

Traitement antigel "T3" (groupe A) : ce traitement a obtenu la hauteur moyenne de tige la plus élevée, soit 20,04 cm. La hauteur la plus élevée pour ce traitement a été mesurée pour la partie P2 (Feuillage) avec 20,14 cm, tandis qu'elle a été la plus faible pour la partie P3 (Plante entière) avec 19,93 cm, soit un écart de 0.21 cm.

Traitement antigel "T1" (groupe A) : il se classe en deuxième position avec une hauteur moyenne de 19,03 cm. Elle a été maximale pour la partie P1 (Tiges) avec 19,38 cm, et minimale pour la partie P2 (Feuillage) avec 18,45 cm, soit un écart de 0.58 cm .

Traitement antigel "T2" (groupe A) : ce traitement est en troisième position avec une moyenne de 17,84 cm. La hauteur maximale a été enregistrée pour la partie P1 (Tiges) avec 18,91 cm, tandis que la minimale a été obtenue pour la partie P2 (Feuillage) avec 17,26 cm, soit un écart de 1.65 cm.

Témoin "T4" (groupe B) : ce traitement présente la longueur de tige la plus faible, avec une moyenne de 10,04 cm. La hauteur maximale a été observée pour la partie P3 (Plante entière) avec 11,3 cm, et la minimale pour la partie P2 (Feuillage) avec 9,14 cm, soit un écart de 1.9 cm.

L'écart de hauteur des plantes entre les traitements en fonction de l'effet anti-gel montre que la différence entre le traitement (T3) et le témoin (T4) est de 10 cm.

Les écarts-types révèlent des variabilités engendrées entre le témoin (non traité : T4) et l'ensemble des traitements anti-gel, suggérant que les traitements T1, T2, et T3 ont un effet stabilisateur sur la croissance des plantes.

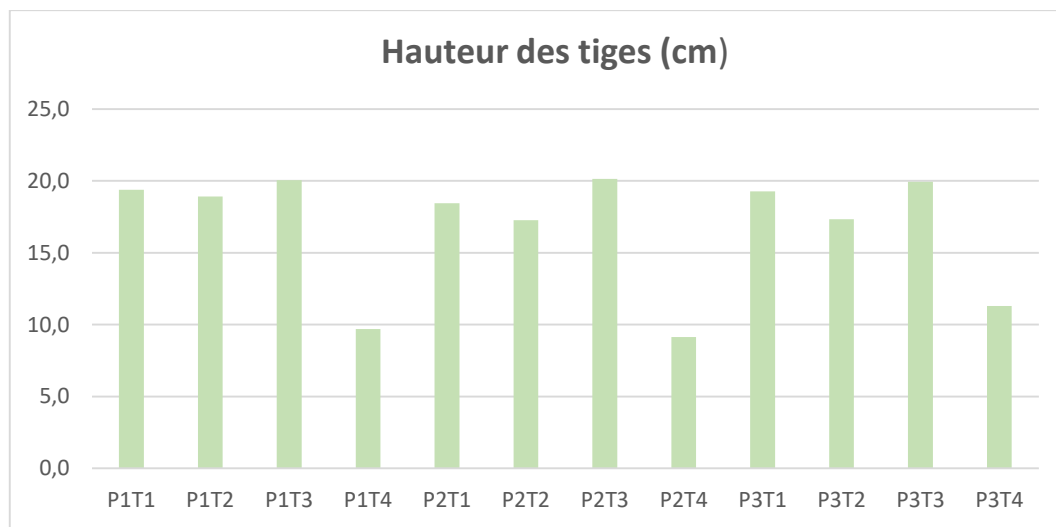
En conclusion, les traitements antigel T1, T2, et T3 montrent un effet positif significatif sur la longueur des tiges par rapport au témoin non traité (T4). Le traitement T3 est le plus efficace, suivi de près par T1 et T2. Ces résultats indiquent que ces traitements antigel sont efficaces pour protéger les plantes contre les dommages causés par le gel, favorisant ainsi une meilleure croissance des tiges.

Tableau 16:analyse de moyennes de la hauteur de la plante en fonction des traitements par partie traitée.

	Tiges (P1)	Feuillage (P2)	Plante entière (P3)	Moyenne
Traitement T1	19,384±1,277	18,45±1,524	19,269±1,1	19,03
Traitement T2	18,911±1,997	17,263±1,265	17,344±0,382	17.84
Traitement T3	20,057±0,842	20,14±0,753	19,932±1,375	20.03
Traitement T4	9,694±3,23	9,139±4,93	11,3±4,583	10.04

Tableau 17:groupes homogènes pour le facteur traitement antigél

F2	Libelles	Moyennes	Groupes Homogenes	
3.0	T3	20,043	A	
1.0	T1	19,034	A	
2.0	T2	17,839	A	
4.0	T4	10,044		B

**Figure 29:** Effet des traitements antigél et le mode de traitement sur la hauteur de la plante

2.3.1.2. Nombre de tiges par plante (NT/P)

L'analyse de la variance pour le nombre de tiges par plante (NT/P) a révélé une différence hautement significative ($p < 0,001$) entre les traitements antigél, et hautement significatives pour la partie traitée de la plantes et non significatives pour leur combinaison, avec un coefficient de variation de 45,56 % (Tableau 18).

Le test de comparaison de Newman-Keuls a permis de classer les traitements anti-gel et les parties traitées de la plante en deux groupes homogènes (A et B) respectivement.

Tableau 18 : Analyse de la variance du nombre de tige

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Proba	E.T.	C.V.
Var.Totale	306,062	35	8,745				
Var.Facteur 1	33,871	2	16,936	4,702	0,01868		
Var.Facteur 2	145,606	3	48,535	13,474	0,00003		
Var.Inter F1*2	40,135	6	6,689	1,857	0,12965		
Var.Residuelle 1	86,45	24	3,602			1,898	45,56%

L'analyse des moyennes révèle que la moyenne générale du nombre de tiges des essais s'élève à 4 tiges par plantes, avec un écart-type de 2 tiges par plantes. Les traitements se classent selon le nombre moyen de tiges comme suit :

Traitement antigel T3 (classé dans le groupe A) : ce traitement présente le nombre moyen de tiges le plus élevé avec 7 tiges par plante. Le nombre maximal a été enregistré pour la partie la plante entière (P3) avec 9 tiges par plante.

Traitement antigel T2 (classé dans le groupe A) : il occupe la deuxième position avec une moyenne de 5 tiges par plante. La valeur maximale a été observée pour la partie du feuillage (P2), avec 5 tiges par plante.

Traitement antigel T1 (classé dans le groupe A) : ce traitement se classe en troisième position avec une moyenne de 4 tiges par plante. La valeur maximale a été obtenue pour la plante entière (P3), avec 7 tiges par plante.

Témoin non traité T4 (classé dans le groupe B) : ce groupe présente le nombre de tiges le plus faible, avec une moyenne de 1 tige par plante pour toutes les parties de la plante : tiges, feuillage et plante entière (P1, P2 et P3).

L'écart entre le traitement anti-gel le plus performant (T3) et le témoin, non traité (T4) est de 6 tiges par plante .

Par partie de la plante, l'analyse des moyennes du nombre de tiges pour les différentes parties de la plante montre que **la plante entière** (P3) a le nombre moyen de tiges le plus élevé avec 6

tiges par plante, classée dans le groupe A. Tandis que les *parties tiges* (P1) et *feuillage* (P2) présentent chacune une moyennede 3 tiges par plante et sont classées dans le groupe B.

Les écarts-types montrent une variabilité importante, en particulier pour les traitements T2 et T3, indiquant une réponse non uniforme des plantes à ces traitements.

En conclusion, les résultats indiquent que les traitements antigel T1, T2, et T3 ont un impact positif et significatif sur le nombre de tiges par plantepar rapport au témoin non traité (T4). Les traitements T3, T2, et T1 forment un groupe homogène statistiquement supérieur au témoin T4. Le traitement antigel T3 s'avère le plus efficace, suivi repectivementparles traitements T2 et T1. Ces trois traitements semblent offrir une protection accrue contre le gel, ce qui pourrait se traduire par une meilleure croissance et une performance accrue des plantes en conditions de risque de gel.

Tableau 19: Test de signification à deux facteurs, effet de traitement antigel, partie de plante traitée et leurs interactions pour le nombre de tiges par plante

	Tiges (P1)	Feuillage (P2)	Plante entière (P3)	moyenne
Traitement T1	3,333±1,809	2,381±0,218	7,524±0,577	4
Traitement T2	4,429±2,157	5,048±1,327	4,524±3,382	5
Traitement T3	5,399±1,47	5,256±0,212	9,095±4,418	7
Traitement T4	1±0	1±0	1±0	1

Tableau 20:groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de tiges par plante pour la partie traitée de la plante

F1	Libelles	Moyennes	Groupes Homogenes	
3.0	P3	5,56	A	
1.0	P1	3,54		B
2.0	P2	3,42		B

Tableau 21:groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de tiges par plante pour le traitement antigel

F2	Libelles	Moyennes	Groupes Homogenes	
3.0	T3	6,6	A	
2.0	T2	4,7	A	
1.0	T1	4,4	A	
4.0	T4	1		B

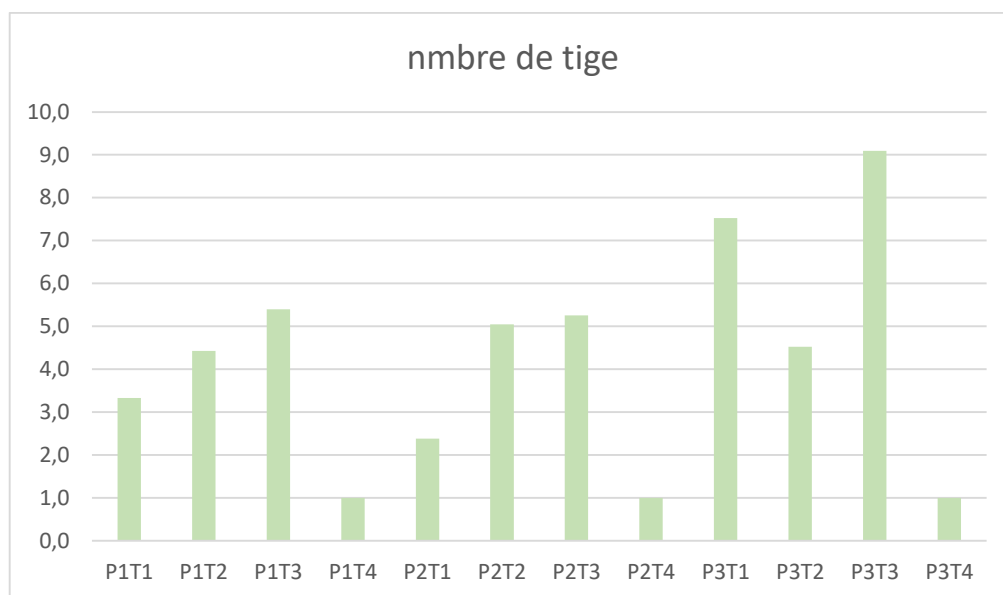


Figure 30: Effet des inter action des traitement et les parties traitées de la plante sur le nombre de tiges par plante.

2.3.1.3. Nombre de feuilles par plante (NF/P)

Les résultats de l'analyse de la variance pour le nombre de feuilles par plante (NF/P) révèlent une différence très significative ($p < 0,001$) entre les traitements antigel et une différence significative entre les partie traitées de la plante ($p < 0,05$), avec un coefficient de variation de 26,27 % comme le montre le tableau 22.

Le test de comparaison de Newman-Keuls a permis de classer les traitements en trois groupes homogènes (A, B et C) et les parties traitées de la plante en deux groupes homogènes (A et B).

Tableau 22: Analyse de la variance du le nombre de feuilles par plante

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Proba	E.T.	C.V.
Var.Totale	9704,225	35	277,264				
Var.Facteur 1	489,25	2	244,625	3,939	0,03254		
Var.Facteur 2	7114,849	3	2371,616	38,188	0		
Var.Inter F1*2	609,648	6	101,608	1,636	0,17999		
Var.Residuelle 1	1490,479	24	62,103			7,881	26,27 %

L'analyse des moyennes révèle que la moyenne générale du nombre de feuilles par plante est de 30 feuilles, avec un écart-type de 8 feuilles par plante. Les traitements antigel sont classés selon le nombre moyen de feuilles par plante comme suit :

Traitement antigel T3(classé dans le groupe A) : ce traitement présente le nombre moyen de feuilles le plus élevé avec 46 feuilles. Le nombre maximal de feuilles par plante a été observé dans la plante entière (P3) avec 54 feuilles.

Traitement antigel T2(classé dans le groupe A) : ce traitement a une moyenne de 34 feuilles, se classant en deuxième position. Le nombre maximal a été mesuré pour la partie feuillage (P2) avec 44 feuilles.

Traitement antigel T1(classé dans le groupe B):ce traitement se classe en troisième position avec une moyenne de 33 feuilles. La valeur maximale a été enregistrée pour la plante entière (P3) avec 39 feuilles.

Témoin non traité T4 (classé dans le groupe C):ce groupe présente le nombre de feuilles le plus faible avec 7feuilles pour toutes les parties de la plante.

L'écart entre le traitement anti-gel le plus performant (T3) et le témoin non traité (T4) est de 38 feuilles.

Par partie de plante traitée, les moyennes du nombre de feuilles évolue comme suit :

Plante entière (P3), classée dans le groupe A, a le nombre moyen de feuilles par plante le plus élevé avec 33.

Partie feuillage (P2), classée dans le groupe A, présente une moyenne presque similaire à celle de la plante entière (P3) avec 32 feuilles par plante.

Partie tiges (P1), classée dans le groupe B, a la moyenne la plus faible avec 25 feuilles.

L'interaction entre les traitements antigel et les parties de la plante traitées n'est pas statistiquement significative (Tableau 22), ce qui suggère que les effets des traitements sont relativement uniformes sur toutes les parties de la plante.

Les écarts-types indiquent une variabilité importante, en particulier entre les traitements T1 et T3, ce qui suggère une réponse non uniforme des plantes aux traitements antigel.

En conclusion, les traitements antigel T1, T2 et T3 ont un effet positif et significatif sur le nombre de feuilles par rapport au témoin non traité (T4). Le traitement antigel T3 se distingue comme le plus efficace, suivi par T2 et T1, qui forment un groupe homogène intermédiaire. Ces

résultats suggèrent que les traitements antigél pourraient améliorer la croissance foliaire et potentiellement la productivité des plantes en conditions de risque de gel, en offrant une meilleure protection contre le gel, en favorisant une meilleure capacité photosynthétique.

Tableau 23: Test de signification à deux facteurs, effet de traitement antigél, partie de plante traitée et leurs interactions pour le nombre de feuilles par plante.

	Tiges (P1)	Feuillage (P2)	Plante entière (P3)	Moyenne
Traitement T1	27,4±3,4	31,6±5,2	39,4±18,4	31
Traitement T2	26,4±5,029	44,3±8,7	32,7±2,3	34
Traitement T3	10,7±38,6	43,8±6,5	54,3±10,4	46
Traitement T4	0,8±7,0	7,5±0,5	6,9±0,9	7

Tableau 24: groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de feuilles par plante pour la partie traitée de la plante.

F1	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes	
3.0	P3	33,4	A	
2.0	P2	31,8	A	
1.0	P1	24,9		B

Tableau 25: groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de feuilles par plante pour le facteur traitement antigél.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
3.0	T3	45,6	A		
2.0	T2	34,5		B	
1.0	T1	32,8		B	
4.0	T4	7,2			C

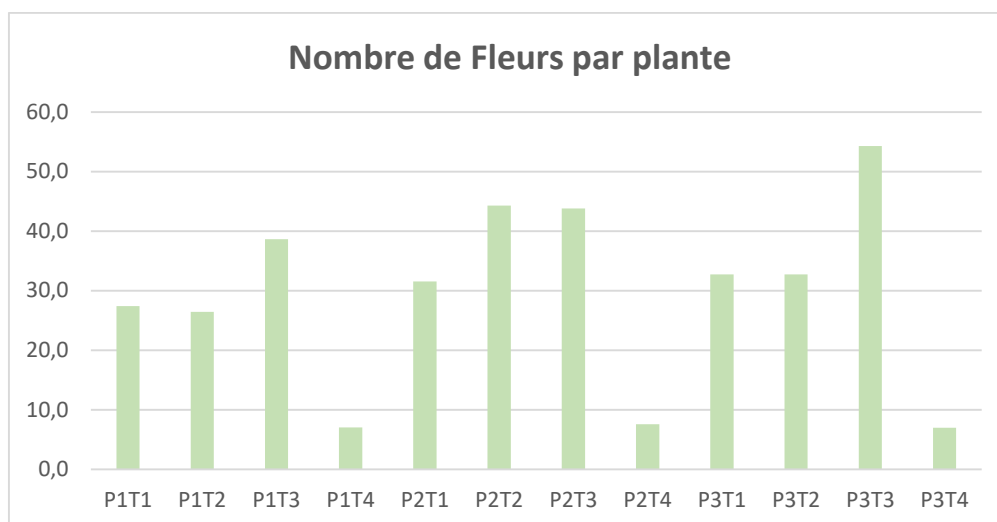


Figure 31: Effet d'interaction de la partie de plante et les traitements antigél sur le nombre de fleurs par plante

2.3.1.4. Nombre de Fleurs par plante (NFr/P)

Les résultats de l'analyse de la variance pour le nombre de fleurs par plante (NFr/ P) révèlent une différence très significative ($p < 0,001$) entre les traitements antigél, avec un coefficient de variation de 50,57 % (Tableau 26).

Le test de Newman-Keuls a permis de classer les traitements en trois groupes homogènes (A, B et C).

Tableau 26: Analyse de la variance du nombre de fleurs

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Proba	E.T.	C.V.
Var. totale	781,313	35	22,323				
Var. facteur 1	33,26	2	16,63	1,939	0,16404		
Var. facteur 2	479,146	3	159,715	18,619	0		
Var. inter F1*2	63,031	6	10,505	1,225	0,32834		
Var.residuelle 1	205,875	24	8,578			2,929	50,57%

L'analyse du test de comparaison a montré que la moyenne générale du nombre de fleurs par plante est de 23 fleurs avec un écart-type de 3 fleurs par plante. Le facteur traitements se classe selon le nombre moyen de fleurs par plante comme suit :

Traitement antigel T3, classé dans le groupe A: ce traitement présente un nombre moyen de fleurs par plante le plus élevé avec 28 fleurs pour la partie tiges(P1), 50 fleurs pour la partie feuillage(P2) et 52 fleurs par plante pour la plante entière(P3),

Traitement antigel T1, classé dans le groupe B: ce traitement se classe en deuxième position avec un nombre moyen de 21 fleurs dans la partie P1 (tiges), 27 dans la partie P2 (feuillage) et 34 dans la partie P3 (plante entière).

Traitement antigel T2, classé dans le groupe B : est en troisième position avec une moyenne de 18 fleurs pour la partie traitée P1 (tiges), 16 pour la partie traitée P2 (Feuilleage), et 24 pour la partie P3 (plante entière).

Témoin non traité T4, classé dans le groupe C : ce groupe présente le nombre de fleurs le plus faible (2 fleurs). Le témoin "non traité" présente le nombre de fleurs par plante le plus faible, avec une moyenne de 4 fleurs pour la partie traitée P1 (Tiges), 0,33 pour la partie P2 (Feuilleage), et une seule fleur pour la partie P3 (Plante entière).

L'écart du nombre de fleurs entre les traitements (T3) et le témoin (T4) est de 48 fleurs.

Les différences entre les parties traitées de la plante (P1, P2, P3) ne sont pas statistiquement significatives (Tableau 26), suggérant que l'effet des traitements antigel est relativement "uniforme" sur toutes les parties traitées de la plante. De plus, les interactions entre les traitements antigel (F1) et les parties traitées de la plante (F2) n'ont pas montré de différences significatives (Tableau 26), confirmant que l'effet des traitements antigel est le même indépendamment de la partie traitée de la plante.

Les écarts-types montrent des différences importantes entre les traitements antigel, en particulier entre les traitements T3 (antigel C) et T1 (antigel A) et T2 (antigel B), ce qui indique une réponse non uniforme des plantes vis-à-vis de ces traitements.

En conclusion, les traitements antigel T1, T2, et T3 ont un effet positif et significatif sur le nombre de fleurs par plante comparé au témoin non traité (T4). Le traitement antigel T3 se distingue comme le plus efficace, suivi par T1 et T2, qui forment un groupe homogène intermédiaire. Ces résultats suggèrent que ces traitements antigel peuvent améliorer la floraison et potentiellement la productivité des plantes en offrant une meilleure protection contre le gel. En particulier, le traitement antigel T3 semble le plus prometteur pour optimiser la floraison et par conséquent le rendement des plantes en conditions de risque de gel.

Tableau 27: test de signification à deux facteurs de l'effet du traitement antigél et de la partie traitée de la plante, ainsi de leurs interactions pour le nombre de fleurs par plante

	Tiges (P1)	Feuillage (P2)	Plante entière (P3)	Moyenne
Traitement T1	5,25±2,9	6,667±3,9	8,417±4,5	27
Traitement T2	4,583±4,3	3,917±1,0	6,083±2,3	19
Traitement T3	6,917±2,1	12,5±3,7	13,083±3,9	43
Traitement T4	1,667±0,8	0,167±0,3	0,25±0,2	2

Tableau 28 : groupes homogènes des valeurs moyennes du nombre de fleurs par plante pour les traitements antigél.

F2	Libelles	Moyennes	Groupes Homogenes		
3.0	T3	10,8	A		
1.0	T1	6,8		B	
2.0	T2	4,8		B	
4.0	T4	0,7			C

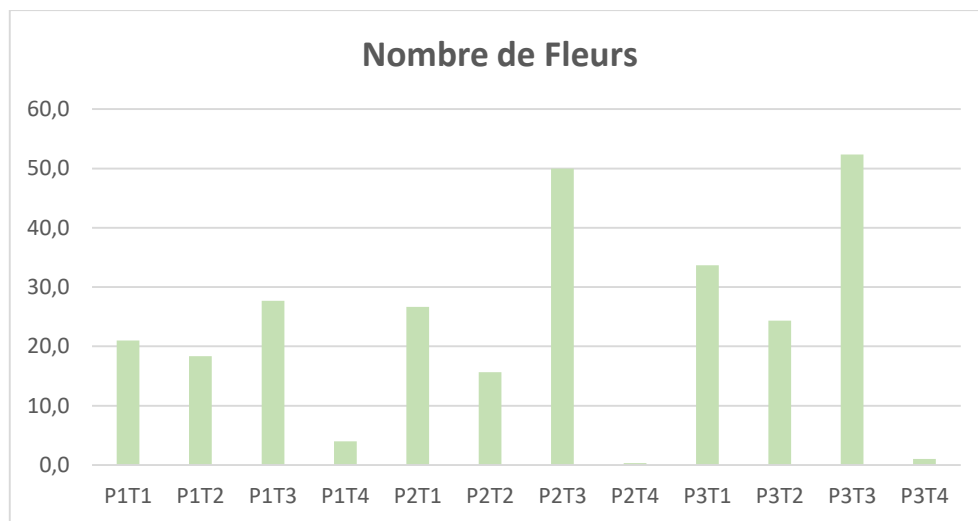


Figure 32: Effet des traitements antigél en fonction des parties traitées de la plante sur le nombre de fleurs par tige.

2.3.2. Caractéristiques agronomiques

2.3.2.1. Poids des fruits (en g) par plante .

Les résultats de l'analyse de la variance pour le poids du fruits par plante révèlent une différence très significative ($p < 0,001$) entre les traitements antigel, avec un coefficient de variation de 51,48 % (Tableau 29).

Le test de comparaison des moyennes a montré trois groupes homogènes (A, B et C), pour les combinaisons de facteur traitements et de facteur partie traitée de la plante.

Tableau 29: Analyse de la variance du poids de fruits par plante

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Proba	E.T.	C.V.
Var.Totale	1797813	35	51366,09				
Var.Facteur 1	103058,5	2	51529,25	3,1	0,06219		
Var.Facteur 2	1173994	3	391331,4	23,545	0		
Var.Inter F1*2	121861,6	6	20310,27	1,222	0,32959		
Var.Residuelle 1	398898,9	24	16620,79			128,922	51,48%

L'analyse du test de comparaison a montré que la moyenne générale du poids de fruits par plante est de 250 g avec un écart-type de 128,9 g . Le facteur traitements se classe selon le poids de fruits par plante comme suit :

Traitement T3 (groupe A) : ce traitement a obtenu le poids moyen de fruits le plus élevé, soit 506 g. Un poids de 607 g, a été mesuré sur la partie traitée P3 (plante entière), suivi des tiges(P1) avec 314 g, et enfin le feuillage(P2), avec 596 g.

Traitement T1 (groupe B) : ce traitement est en deuxième position avec une production moyenne de fruits par plante qui s'élève à 279 g. Le poids le plus élevé a été enregistré sur la partie traitée P3 (plante entière) avec 378 g, avec 234 g pour la partie tiges(P1), 228,2 g pour la partie feuillage(P2).

Traitement T2 (groupe B) : il se classe en troisième position avec un poids moyen de 216 g par plante. Il a été le plus élevé chez la partie traitée P3 (plante entière) avec 272 g. 189 g pour la partie tiges(P1), 186 g pour la partie feuillage(P2).

Témoin T4 (groupe C): la production de fruits par plante est nulle.

L'écart de poids des fruits par plante entre les traitements montre une valeur de 506g par plante.

Les écarts-types révèlent des variabilités notables entre le témoin (non traité : T4) et l'ensemble des traitements, suggérant que l'ensemble de traitements T1, T2, et T3 ont un effet stabilisateur sur le poids des fruits par plante.

Les différences entre les parties traitées de la plante (P1, P2, P3) ne sont pas statistiquement significatives (Tableau 29), suggérant que l'effet des traitements antigel est relativement "uniforme" sur toutes les parties traitées de la plante. En outre, les interactions entre les traitements antigel (F1) et les parties traitées de la plante (F2) ont donné des différences significatives (Tableau 29), Ceci peut montrer l'effet de l'antigel sur les plantes du piment en fonction de la partie traitée. Le traitement de la partie entière (P3) avec l'antigel T3 a donné des résultats satisfaisant relativement aux deux autres formules d'antigel.

Quant aux écarts-types, ils montrent des différences importantes entre les traitements antigel, en particulier entre les traitements T3, T1 et T2, ce qui indique une réponse non uniforme des plantes vis-à-vis ces traitements.

En conclusion, les traitements antigel T1, T2, et T3 ont un effet positif et significatif sur le poids de fruits par plante comparé au témoin, non traité, T4. Le traitement antigel T3 se distingue comme le plus efficace, suivi par T1 et T2, qui forment un groupe homogène intermédiaire. Ces résultats suggèrent que ces traitements antigel peuvent améliorer la productivité des plantes en offrant une meilleure protection contre le gel. En particulier, le traitement antigel T3 semble plus prometteur pour optimiser la production de fruits par plante et par conséquent le rendement total de fruits par hectare, surtout en conditions de risque de gel.



Figure 33: mesure de poids de fruits de piment sur une balance de précision

Tableau 30: Test de signification à deux facteurs, de l'effet de traitement antigél et la partie traitée de la plante et leurs interactions pour le poids de fruits.

	Tiges (P1)	Feuillage (P2)	Plante entière (P3)	Moyenne
Traitement T1	231,889±124	228,222±109	377,772±218	279
Traitement T2	189,444±169	185,5±47	272±106	216
Traitement T3	314,278±98	596±174	609,889±207	506
Traitement T4	0±0	0±0	0±0	0

Tableau 31: valeur moyenne du poids de fruits pour la combinaison des deux facteurs étudiés

F1 F2	Libelles	Moyennes	Groupes Homogenes		
3.0	t3	506,722	A		
1.0	t1	279,294		B	
2.0	t2	215,648		B	
4.0	t4	0			C

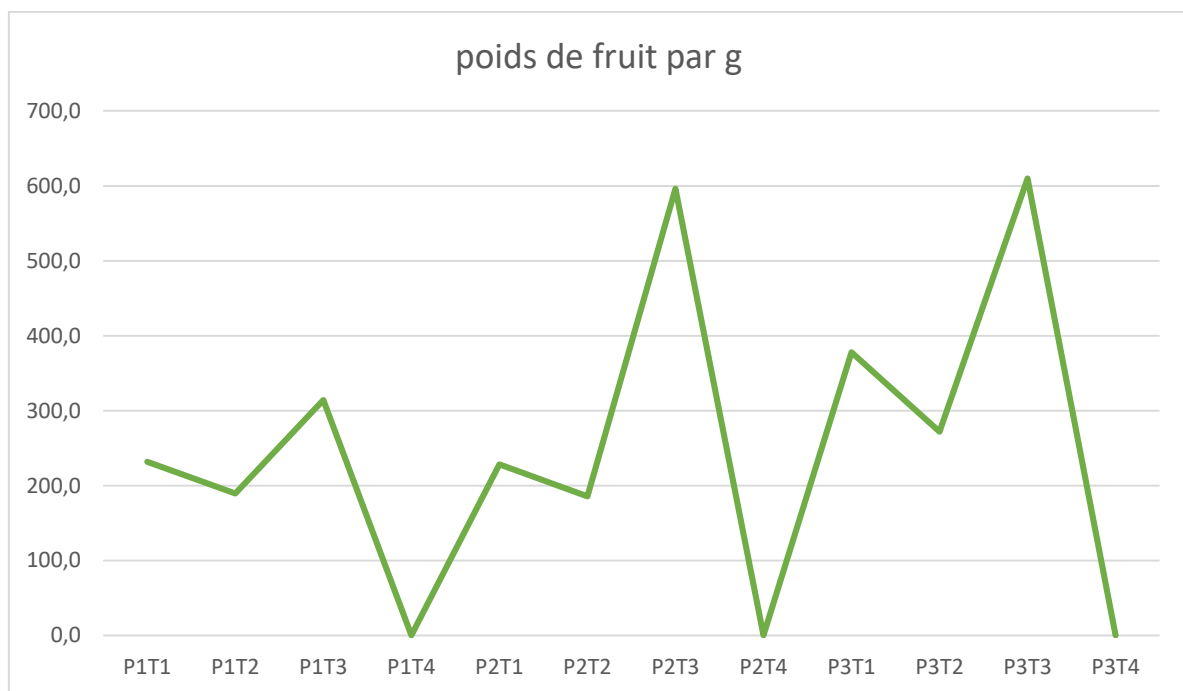


Figure 34: Effet d'interaction de la partie de la plante traitée et le traitement antigél sur le poids de fruits

2.3.2.2. Rendement calculé de fruits (q/ ha)

Les résultats de l'analyse de la variance pour le rendement calculé de fruits révèlent des différences très significatives ($p < 0,001$) entre les traitements antigel, avec un coefficient de variation de 51,48 % comme le montre le tableau (32).

L'analyse des moyennes, effectuée à l'aide du test de comparaison de Newman-Keuls, a permis de distinguer trois groupes homogènes (A, B, C).

Tableau 32: Analyse de la variance du rendement calculé de fruits

	S.C.E	DDL	C.M.	Test F	Proba	E.T.	C.V.
Var.totale	71912,53	35	2054,644				
Var.facteur 1	4122,344	2	2061,172	3,1	0,06219		
Var.facteur 2	46959,76	3	15653,25	23,545	0		
Var.inter f1*2	4874,461	6	812,41	1,222	0,32959		
Var.residuelle 1	15955,97	24	664,832			25,784	51,48%

Les statistiques descriptives, montrent que la moyenne générale de l'essai relative au rendement de fruits a été de 50 q/ ha) avec un écart-type de 26 q/ ha. Les traitements se classent selon le rendement moyen comme suit :

Traitement T3: ce traitement a obtenu le rendement moyen en fruits le plus élevé 101 q/ha, Le rendement le plus élevé pour ce traitement a été mesuré chez la partie traitée P2 (Feuillage) avec 119 q/ha et la partie traitée P3 (Plante entière) avec 121,9 q/ha, tandis qu'il a été le plus faible chez la partie traitée P1 (Tiges) avec 62,8 q/ha.

Traitement T1: ce traitement occupe la deuxième position avec moyen 56 q/ha. Le rendement le plus élevé a été observé chez la partie traitée P3 (Plante entière) avec 75,5 q/ha, par contre, la valeur minimale a été obtenue chez la partie P2 (Feuillage) avec 46 q/ha et la partie traitée P1 (tiges) avec 46,4 q/ha.

Traitement T2: se classe en troisième position avec moyen 43 q/ha. Le rendement le plus élevé a été enregistré chez la partie traitée P3 (Plante entière) avec 54,4 q/ha, et le rendement le plus faible a été obtenu chez la partie traitée P1 (Tiges) et la partie traitée P2 (Feuillage) avec 37,1 q/ha.

Témoin non traité T4: ce traitement présente une production nulle chez toutes les parties traitées (P1, P2 et P3).

L'écart de rendement entre les traitements en fonction de l'effet antigel montre une différence notable entre le traitement le plus efficace (T3 : le feuillage) et le témoin (T4 : non traité), qui est de 101 q/ ha

Les écarts-types révèlent des variabilités tangibles entre le témoin (non traité: T4) et l'ensemble des traitements antigel, suggérant que les traitements T1, T2 et T3 ont un effet stabilisateur sur le rendement des plantes.

En conclusion, les traitements antigel T1, T2, et T3 montrent un effet positif significatif sur le rendement par rapport au témoin non traité (T4). Le traitement T3 est le plus efficace, suivi de près par T2 et enfin T1. Ces résultats indiquent que ces traitements antigel sont efficaces pour protéger les plantes contre les dommages causés par le gel, favorisant ainsi un meilleur rendement.

Tableau 33 :Analyse de signification à deux facteurs de l'effet de traitement antigel et partie traitée de la plante et leurs interactions pour le rendement en fruits

	Tiges (P1)	Feuillage (P2)	Plante entière (P3)	Moyenne
Traitement T1	46,4±24,71	45,6±21,7	75,5±43,7	56
Traitement T2	37,9±33,7	37,1±9,5	54,4±21,2	43
Traitement T3	62,8±19,6	119,2±34,7	121,9±41,5	101
Traitement T4	0±0	0±0	0±0	0

Tableau 34 : valeur moyenne du rendement pour la combinaison des deux facteurs étudiés

F1 F2	Libelles	Moyennes	Groupes homogènes		
3.0	t3	101,344	A		
1.0	t1	55,859		B	
2.0	t2	43,13		B	
4.0	t4	0			C

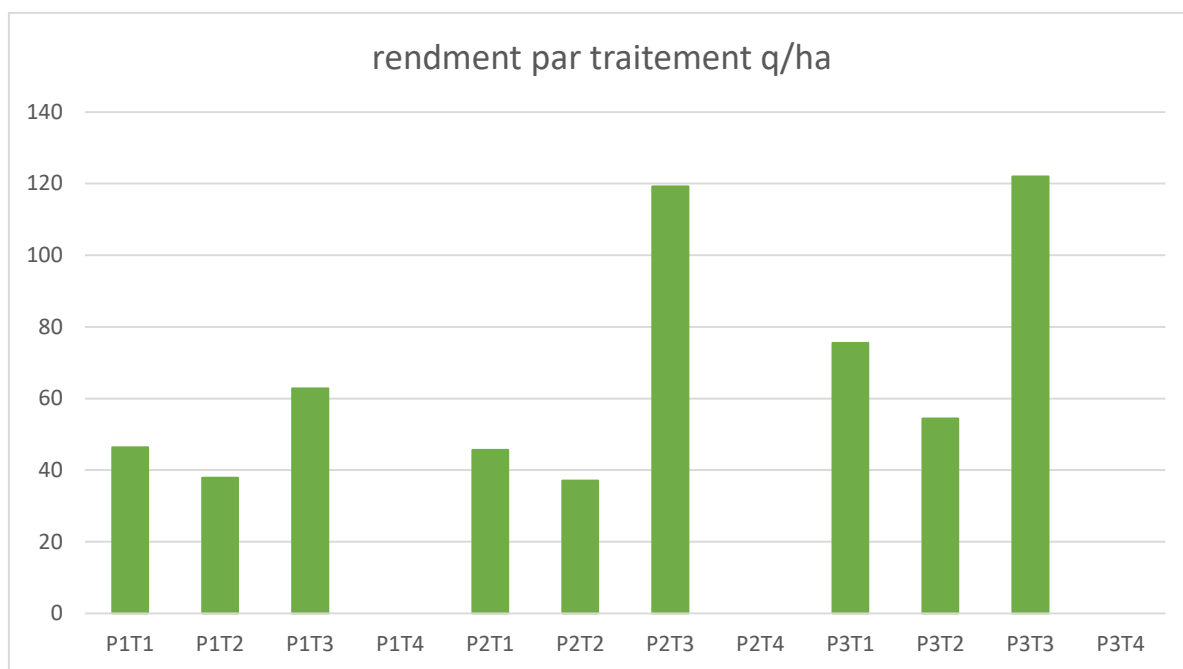


Figure 35: Effet d'interaction de la partie de la plante traitée et le traitement antigél sur le rendement



Figure 36 : Coupe vertical d'unfruits de piment (photo originale)

2.3.3 Conclusion

Les traitements antigél, notamment le traitement T3, ont montré des améliorations significatives de tous les paramètres évalués par rapport au témoin non traité (T4). Ils ont en effet amélioré la longueur des tiges, le nombre de tiges, le nombre de feuilles, le nombre de fleurs, le poids des

fruits par plant, le rendement des fruits. Le traitement T3 s'est révélé le plus efficace dans la plupart des cas, avec des améliorations notables par rapport aux autres traitements et au témoin. Les résultats suggèrent que ces traitements antigel peuvent offrir une protection efficace contre le gel et améliorer la croissance et la productivité des plantes.

*Des exemples de quelques échantillons de plantes avant traitement et après la fin du suivi :

A. Plantes non traitées (T0) :



B. Plantes traitées par traitement 1 :



C. Plantes traitées par Traitement 2:



D. Plante traitées par Traitement 3 :



Deuxième Partie : Volet électronique

Parti III : *Système de Pulvérisation Intelligent pour les Solutions à Usages Agricoles*

III.1 Introduction

L'agriculture joue un rôle central dans la satisfaction des besoins alimentaires de l'être humain, en plus de sa contribution significative à l'économie mondiale. Cependant, l'agriculture fait face à de nombreux défis environnementaux et climatiques qui peuvent avoir un impact négatif sur la productivité et la qualité des cultures.

Parmi ces nombreux défis auxquels l'agriculture est confrontée, le gel est le phénomène météorologique le plus redouté. Il représente une menace importante, en particulier dans les régions où le climat est sujet à des variations soudaines. Les agriculteurs doivent souvent adapter leurs pratiques pour protéger leurs cultures contre ces baisses rudes de température, qui peuvent causer de lourdes pertes (Brun et Denieulle2023).



Figure 37 : Déposition du gel sur les plantes

Le gel survient lorsque les températures descendent sous le point de congélation, transformant la vapeur d'eau en cristaux de glace qui se déposent sur les plantes. Ce phénomène affecte à la fois les jeunes pousses et les plantes matures, compromettant la qualité et la quantité des récoltes. Lorsque l'eau des cellules végétales gèle, les tissus sont endommagés, perturbant les fonctions vitales des plantes et entraînant leur détérioration, causant ainsi d'importantes pertes économiques pour les agriculteurs (Smith & Jones2010).

Pour relever ce défi, le besoin de développer des solutions innovantes et efficaces pour protéger les plantes contre les effets dévastateurs du gel est devenu impératif. Dans ce contexte, le projet *"Antigel naturel pour les plantes avec un système de pulvérisation intelligent"* se présente comme une réponse avancée à ce problème.

Ce projet propose de créer un **"Système de Pulvérisation Automatique"** (SPA) des substances naturelles pour protéger les plantes contre le gel. Le SPA utilise des technologies intelligentes pour surveiller les variations de température et prédire les épisodes de gel.

Lorsque la température approche du gel, le SPA applique un antigel naturel pour préserver les plantes. Cette approche efficace et durable aide à réduire les dommages causés par le gel, tout en soutenant la protection de l'environnement et en augmentant la productivité agricole.

Dans ce qui suit nous analyserons en détail les composants électroniques constituant le SPA, son principe de fonctionnement et son efficacité dans divers environnements. Nous espérons que cette solution innovante favorisera l'agriculture durable, réduira les pertes dues aux changements climatiques et améliorera la sécurité alimentaire à long terme.

III.2 Partie Théorique

Le SPA fonctionne à l'aide de l'énergie solaire, utilisant ainsi une forme des énergies renouvelables. Ce système surveille et prévoit les variations brusques de la température pour une bonne prédiction du gel à l'aide de capteurs. Les informations collectées sont envoyées sous forme d'alertes par message, permettant au système de réagir au bon moment. Nous allons maintenant exposer les composants électroniques et des éléments de notre système.

III.2.1 Carte ArduinoUno

La carte ArduinoUno est une carte microcontrôleur open-source basée sur la puce microcontrôleur Atmel AVR. Elle fait partie des cartes les plus populaires de la famille Arduino, largement utilisée pour le prototypage et le développement de divers projets électroniques.

L'ArduinoUno est conçue pour être facile à utiliser, ayant un environnement de programmation simple basé sur le langage C++. Elle est compatible avec une large gamme de capteurs, moteurs et autres composants électroniques, ce qui en fait une plateforme polyvalente pour la réalisation de divers projets électroniques(Banzy&Shiloh, 2015)

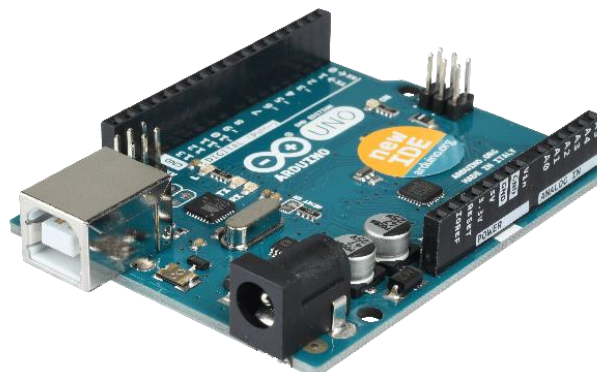


Figure38: Carte ArduinoUno

Le rôle de la carte ArduinoUno est de fournir une plateforme programmable pour la construction de projets électroniques nécessitant un certain degré de contrôle, d'automatisation ou d'interactivité. Elle peut être utilisée pour gérer divers projets tels que ; les robots, des systèmes domotiques avancés (i.e. contrôle d'éclairage, de chauffage) ainsi que des procédés portables tels que ; dispositifs de mesure du rythme cardiaque, de tension artérielle, de glycémie, etc...(Banzi&Shiloh, 2015).

III.2.2 Module GSM (SIM 800L)

Le module de Système Global pour les Communications Mobiles, en Anglais "**Global System for Mobile Communications**" (GSM) est un standard de communication cellulaire numérique utilisé pour les services vocaux et de données sur les téléphones mobiles. Le module GSM est une technologie de réseau sans fil qui permet aux appareils mobiles de se connecter aux réseaux cellulaires, de passer des appels téléphoniques, d'envoyer des messages courts et d'accéder à Internet(SIM Com)

**Figure 39 :** Module GSM (SIM 800L)

Le module GSM utilise une carte SIM "**SubscriberIdentity Module**" qui contient des informations uniques sur le numéro de téléphone de l'utilisateur et les informations de compte. Le standard GSM a été développé par "**EuropeanTelecommunication Standard Institute**" (ETSI) est largement utilisé dans plus de 200 pays à travers le monde entier.

En plus du rôle principal du GSM, qui est de fournir un moyen fiable et sécurisé pour les communications vocales et de données via un réseau sans fil, on a quelques rôles spécifiques du GSM qui sont comme suit (SIMCom) :

- ❖ **Roaming** : Le GSM permet aux utilisateurs de voyager dans différents pays et d'utiliser leurs appareils mobiles pour passer des appels et accéder aux données.
- ❖ **Sécurité** : Le GSM offre un cryptage pour protéger les communications vocales et les données contre l'interception et l'écoute clandestine.
- ❖ **Gestion du réseau** : Le GSM permet une gestion efficace du réseau, y compris la surveillance et le contrôle du trafic réseau et l'allocation des ressources réseau.

III.2.3 Afficheur à Cristaux Liquides (ou LCD)

L'Afficheur à Cristaux Liquides, en Anglais "**Liquide Cristal Display**" (LCD) est un type d'afficheur plat qui utilise des cristaux liquides pour contrôler le passage de la lumière à travers une matrice d'affichage. Les afficheurs LCD sont généralement utilisés dans les appareils électroniques tels que les téléviseurs, les moniteurs d'ordinateur, les appareils photo numériques et les téléphones portables.

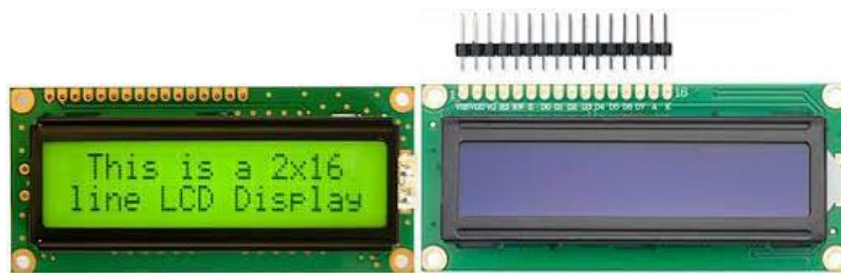


Figure 40 : Afficheur à Cristaux Liquides (LCD)

La structure de base d'un LCD consiste en une couche de cristaux liquides prise en sandwich entre deux électrodes transparentes. Lorsqu'un courant électrique est appliqué aux électrodes, les cristaux liquides s'alignent pour permettre ou bloquer le passage de la lumière, selon la tension. L'afficheur LCD est rétroéclairé par une source de lumière telle que des LED, des fluorescents ou des électroluminescents(Wong W 2019).

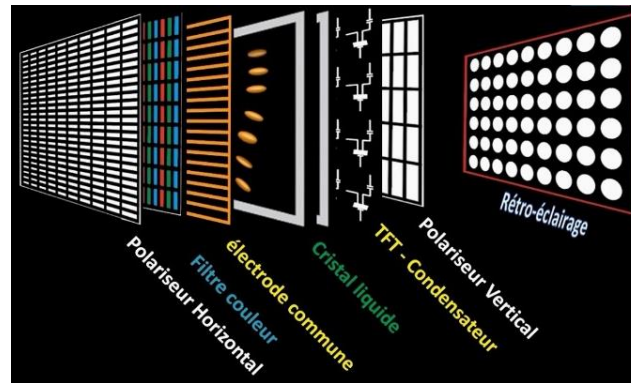


Figure41: Structure Interne d'un LCD

Les afficheurs LCD consomment moins d'énergie par rapport aux anciennes technologies d'affichage, ce qui les rend populaires dans les appareils électroniques modernes. Plusieurs types d'afficheurs LCD existent dans le marché, tels que ; les afficheurs nématiques torsadés (TN), les commutations dans le plan (IPS) et les alignements verticaux (VA), et chaque type a ses avantages et ses inconvénients.

III.2.4 Capteur d'humidité et de température (DHT22)

Le capteur (DHT22), également connu sous le nom (AM2302), est un capteur numérique d'humidité et de température. Le DHT22, qui fait partie de la série de capteurs DHT, est largement utilisés dans le contrôle climatique et la surveillance environnementale(Adafruit.)

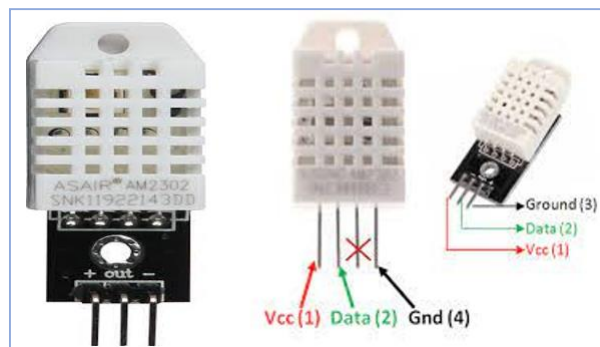


Figure 42 : Capteur d'humidité et de température (DHT22)

Le DHT22, qui comprend un élément thermique et un élément d'humidité, est un capteur numérique de température et d'humidité. Il est utilisé pour mesurer à la fois la température ambiante et le taux d'humidité relative de l'air. Le DHT22 est reconnu pour sa grande précision,

car il est capable de mesurer des températures comprises entre -40°C et 125°C avec une tolérance de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ainsi que l'humidité relative de l'air allant de 0% à 100% avec une précision de ± 2 à 5%. La transmission de ces informations est sous forme numérique, ce qui le rend facile à utiliser avec les cartes Arduino ou Raspberry Pi.

Le DHT22 est largement utilisé dans les projets d'électronique et de domotique pour surveiller les conditions environnementales. En agriculture, il aide à suivre la température du sol pour optimiser les périodes de plantation et d'irrigation, ainsi que l'humidité des serres pour assurer des conditions de croissance idéales, contribuant ainsi à une meilleure productivité et qualité des cultures.

III.2.5 Plaque d'essai (ou Breadboard)

Une plaque d'essai, aussi appelée plaque de prototypage (ou Breadboard en anglais), permet de monter et tester des circuits électroniques avant leur gravure sur les circuits imprimés (PCB, Printed Circuit Board). Elle est constituée d'une base en plastique avec une grille de trous disposés en rangées et colonnes. Ces trous, arrangés selon un motif standard, sont connectés par des bandes métalliques horizontales, facilitant l'insertion et l'interconnexion des composants sans nécessiter de fils ni de soudure.

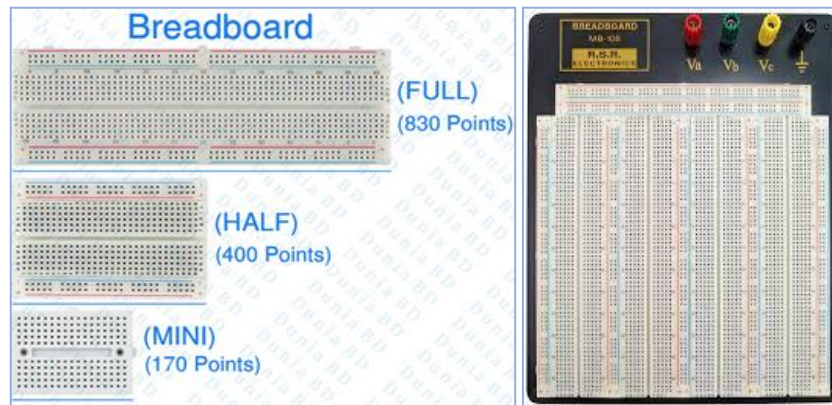


Figure43: Types de plaques d'essai (Breadboard)

Les plaques d'essai existent en plusieurs tailles et diverses configurations, avec les grands modèles offrant plus d'espace pour les circuits complexes. Certaines incluent des rails sur les bords supérieur et inférieur, pour simplifier la connexion de l'alimentation.

Utilisées par les amateurs, les étudiants et les professionnels, les breadboards permettent le prototypage des circuits électroniques, l'expérimentation de diverses configurations et le dépannage de circuits.

III.2.6 Câblage des circuits électroniques

Le câblage des circuits électroniques se réfère à la connexion des différents composants électroniques pour former un circuit fonctionnel. Cela implique de relier les résistances, les condensateurs, les transistors et les circuits intégrés à l'aide de fils de connexion, de pistes imprimées sur une carte ou d'autres moyens de connexion, afin de réaliser les fonctions souhaitées du circuit.

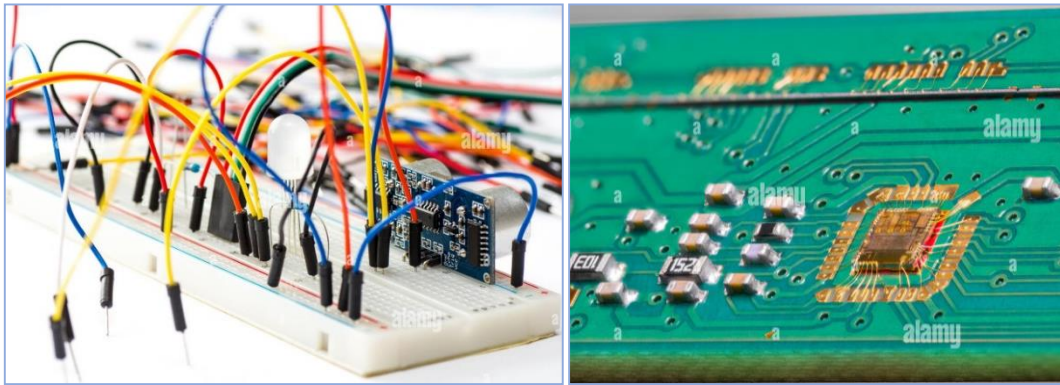


Figure44 : Types de câblage des circuits électroniques

Ce processus est essentiel pour assurer le bon fonctionnement des circuits électroniques et peut se faire sur une breadboard pour les prototypes ou sur un circuit imprimé pour les produits finis.

III.2.7 Sources d'énergie

III.2.7.1 Énergie Solaire

L'énergie solaire convertit la lumière du soleil en électricité via des cellules photovoltaïques, essentielles à ce processus. Cette source d'énergie durable et écologique alimente divers appareils tels que des lampes, des systèmes électroniques, des dispositifs de surveillance et d'irrigation, offrant une alternative respectueuse de l'environnement pour répondre à divers besoins énergétiques.

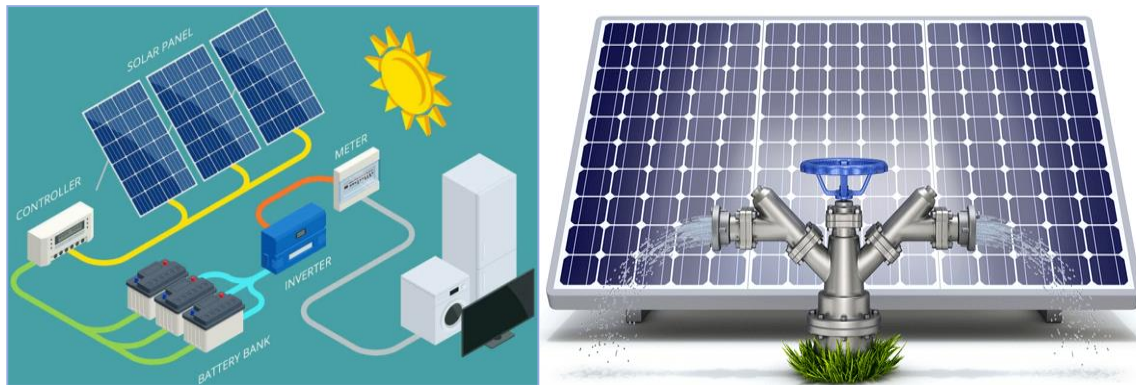


Figure 45 : Système de production d'énergie solaire

Les applications avancées utilisent l'énergie solaire pour alimenter des systèmes distants, des appareils autonomes, des technologies intelligentes et des solutions environnementales nécessitant des sources d'énergie propres et renouvelables.

Les principaux avantages de l'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les appareils incluent l'indépendance vis-à-vis du réseau électrique traditionnel, des économies à long terme, la réduction des émissions de carbone, et l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable et autonome.

III.2.7.2 Batterie

Les batteries sont des dispositifs qui transforment l'énergie chimique stockée dans ses électrodes en énergie électrique. C'est une source portable d'énergie électrique utilisée pour alimenter une large gamme d'appareils, des petits gadgets électroniques aux véhicules électriques.



Figure 46 : Types de batterie

Il existe plusieurs types de batteries, qui varient en formes, tailles et compositions chimiques. Les plus répandues sont les batteries alcalines, au plomb-acide, lithium-ion, nickel-cadmium et nickel-métal hydrure. La capacité d'une batterie, exprimée en (Ah) ou (mAh), indique la quantité d'énergie qu'elle peut stocker. Une capacité plus élevée permet une alimentation prolongée des appareils. La durée de vie d'une batterie dépend de facteurs tels que sa chimie, son utilisation, la température et les conditions de stockage.

III.3 Partie Pratique

Pour assurer le bon fonctionnement du circuit, nous allons le simuler d'abord dans le logiciel Proteus, pour déterminer la bonne configuration du montage. Le logiciel Proteus se compose de deux parties : ARES et ISIS.

III.3.1 Principe de Fonctionnement

Le système SPA est installé avec des pompes, des tuyaux et des buses variées en fonction du type de matériau à pulvériser, qu'il s'agisse de produits chimiques, d'eau ou autre. Les critères requis de température et d'humidité sont déterminés en identifiant les valeurs idéales à maintenir dans l'environnement cible. Lorsque ces valeurs dépassent les limites permises, le système se met en marche.

Les capteurs différents de température et d'humidité collectent continuellement des données, convertissant ces informations en signaux pouvant être traités. En cas de détection de valeurs en dehors de la plage requise, le processeur contrôleur est activé pour émettre les commandes nécessaires à la puce de communication, qui envoie des messages d'alerte aux opérateurs ou aux responsables concernés.

En l'absence de réponse aux messages d'alerte, des procédures d'exploitation préprogrammées sont automatiquement déclenchées. Cela garantit une continuité de fonctionnement optimale du système sans nécessiter d'intervention manuelle, ce qui améliore l'efficacité et permet des économies d'énergie et de ressources.

III.3.2 Simulation avec Proteus

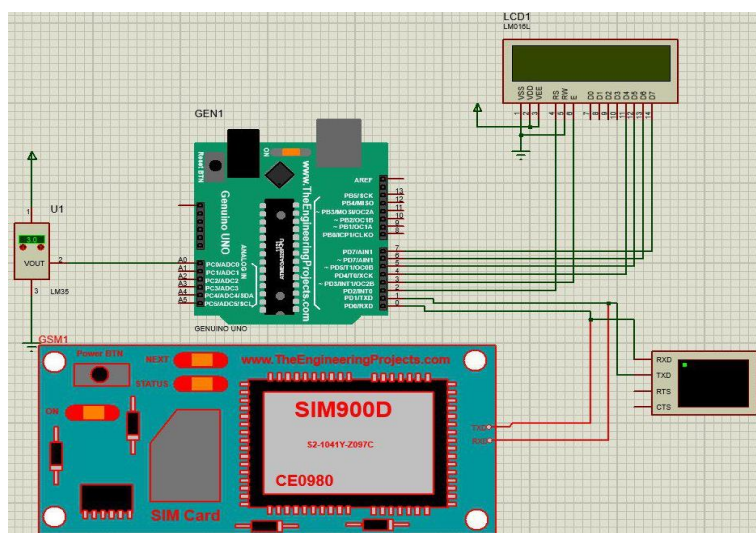


Figure 47 : Circuit du Système SPA dans ISIS

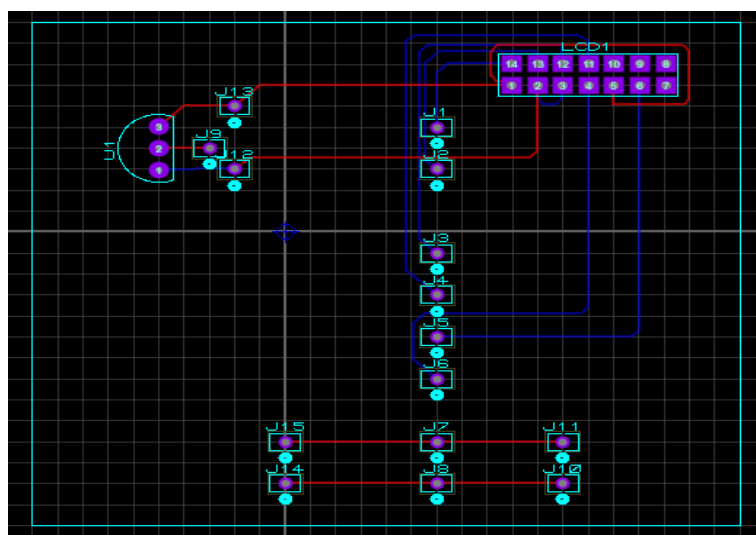


Figure48 :Circuit du Système SPA dans ARES

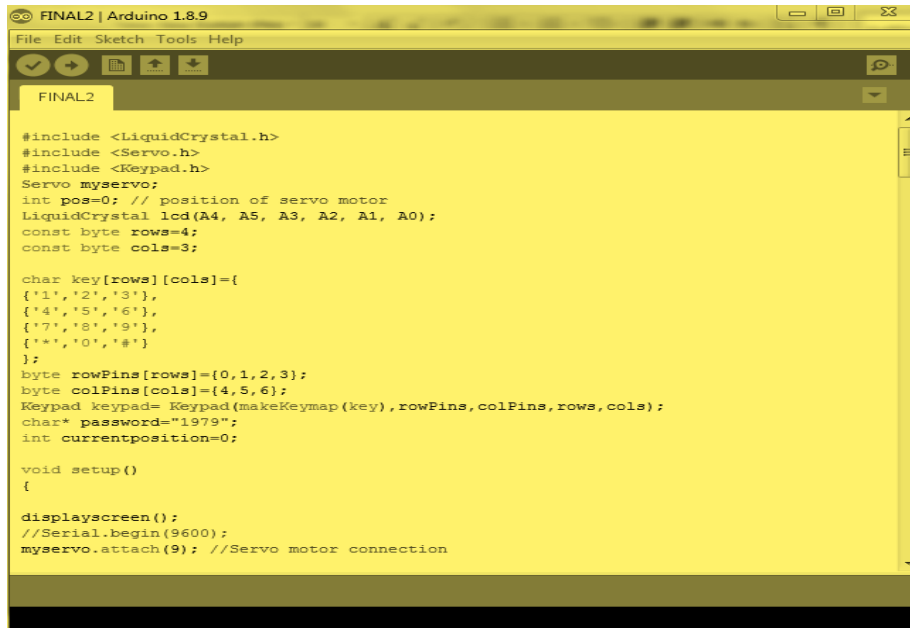


Figure 49 : Interface IDE du notre Programme

III.3.3 Réalisation sur plaque d'essai

La réalisation de circuits sur une plaque d'essai permet de tester et de valider un montage électronique avant sa mise en œuvre définitive. Cette méthode, couramment utilisée pour des prototypes, facilite l'assemblage temporaire des composants sans nécessiter de soudure. En insérant les composants dans les trous prévus sur la plaque, on peut créer facilement des connexions à l'aide de fils conducteurs.

La flexibilité offerte par la plaque d'essai permet des modifications rapides du circuit en cas de besoin. Ce procédé est idéal pour expérimenter, optimiser et résoudre d'éventuels problèmes avant la conception finale sur un circuit imprimé. La réalisation de notre système sur la plaque d'essai est illustrée dans la figure-50 ci-dessous :

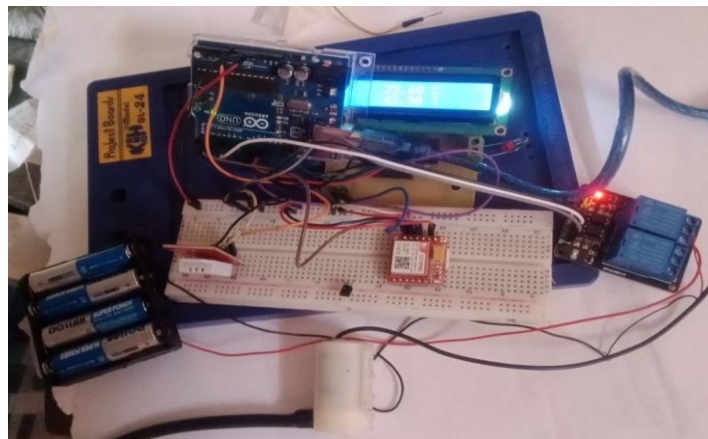


Figure50 : Réalisation de notre système sur plaque d'essai

Conclusion

Cette étude constitue une étape importante vers une compréhension plus approfondie des effets négatifs du gel sur le secteur agricole en Algérie, notamment sur les cultures sensibles telles que les cultures maraîchères et l'arboriculture. Le gel est l'un des principaux facteurs climatiques qui provoquent une détérioration notable de la productivité agricole, affectant ainsi directement les revenus économiques des agriculteurs des zones touchées. Cette étude a clairement montré que l'effet du gel ne se limite pas à réduire les rendements, mais affecte également négativement la qualité globale des produits agricoles, ce qui augmente le fardeau économique des agriculteurs et limite leur capacité à répondre à la demande locale.

Grâce à l'analyse des données collectées, il a été constaté que les méthodes actuelles utilisées pour protéger les cultures du gel, bien que parfois efficaces dans certains contextes, nécessitent une amélioration et une adaptation aux conditions climatiques et géographiques de chaque région afin d'assurer une protection maximale. Il est donc urgent de développer des solutions innovantes et personnalisées, adaptées à la nature et à la diversité des cultures et des différentes régions d'Algérie. Ces solutions doivent pouvoir assurer une protection efficace des cultures, tout en maintenant des coûts raisonnables que les agriculteurs peuvent se permettre.

Par ailleurs, cette recherche souligne l'importance d'adopter une approche proactive et intégrée de gestion des impacts des gels sur l'agriculture algérienne. Cette gestion devrait inclure des stratégies avancées qui prennent en compte les caractéristiques régionales, telles que la variation de l'altitude, du sol et des conditions climatiques locales. L'adaptation de ces stratégies aux besoins spécifiques de chaque région peut contribuer de manière significative à renforcer la capacité des agriculteurs à faire face aux défis liés au gel, améliorant ainsi la durabilité agricole.

En outre, les résultats obtenus dans ces travaux de recherche ouvrent de nouveaux horizons pour le développement de technologies et de pratiques agricoles qui renforceront la résilience des systèmes agricoles face au changement climatique. L'amélioration des méthodes de protection et le développement de nouvelles solutions peuvent contribuer à réduire les pertes agricoles résultant du gel, ce qui aura un impact positif sur la sécurité alimentaire en Algérie.

Enfin, cette étude a prouvé que les traitements antigels, en particulier le traitement **T3 (la troisième formule)**, non seulement protègent les plantes, mais jouent également un rôle essentiel dans l'amélioration de la croissance globale des plantes, offrant une solution viable pour relever les défis posés par des conditions climatiques défavorables. Ce traitement apparaît

donc comme une solution très appropriée pour une gestion stratégique avancée qui prend en compte toutes les circonstances et qui est facile à appliquer, car elle est adaptée à diverses conditions géographiques et climatiques. L'utilisation du système innovant SPA pour pulvériser automatiquement des produits antigel spécifiques aux plantes est un exemple marquant de l'intégration de la technologie dans l'amélioration des pratiques agricoles et de la gestion environnementale.

En déterminant les conditions optimales de température et d'humidité, et en activant le système automatiquement lorsque nécessaire, les agriculteurs et les opérateurs peuvent atteindre un niveau avancé d'efficacité et de durabilité.

Cette approche permet également de réduire l'intervention humaine directe et les coûts associés, renforçant ainsi la productivité tout en préservant la santé des plantes dans des conditions environnementales changeantes.

Reference bibliographies

Adafruit. *DHT22 Temperature and Humidity Sensor.* Retrieved from <https://learn.adafruit.com/dht>

. **A.S.W.M.**, (2014). *Annuaire Statistique De La Wilaya De m'sila.* 134p.

Amroune, A., (2008). *Hydrogéologie Et Qualité Des Eaux Souterraines De La Plaine De Msila.* Algérie. Mém. De Master. Univ. Batna. 133p.

Andrea Ertani Et Al., (2015). Paolo Sambo. *The Use Of Organic Biostimulants In Hot Pepper Plants To Help Low Input Sustainable Agriculture.*

Attaway, J. A., (1997). *A History Of Florida Citrus Freezes.* Florida Science Source, Inc.

Badache, (2015). *Caractérisation Des Populations Locales De Piment (CapsicumFrutescens L.) Dans Les Conditions Hydro-Pédologiques De Ziban Moyennant Des Descripteurs Quantitatifs.* Mémoire De Master Option Production Végétale, Université De Biskra. P. 65.

Bahri, K., &Bouafia, S., (2016). *Plantes Rudérales De La Région De m'sila : Inventaire, Chorologie Et Systématique.* Thème De Master Académique : Gestion De l'environnement. Université Mohamed Boudiaf De m'sila. 60p.

Bagdonas, A., Georg, J. C., & Gerber, J. F., (1978). *Techniques Of Frost Prediction And Methods Of Frost And Cold Protection.* World Meteorological Organization Technical Note, No. 157. Geneva, Switzerland.

Banzi, M., & Shiloh, M. (2015). *Getting Started with Arduino (3rd ed.). Maker Media.*

Bayat, A. (Ed.). (2022). *Sustainable Agriculture Technologies - I.* Iksad Publishing House.

Blanc, M. L., Geslin, H., Holzberg, I. A., & Mason, B., (1963). *Protection Against Frost Damage.* Wmo, Technical Note, No. 51. Geneva, Switzerland.

Bouragaa, M., (2019). *Contribution A l'étude Des Ravageurs Insectes Des Cultures Maraichères Sous Serre Dans La Région De Biskra. Cas De MyzusPersicae (Hemiptera, Aphididae).* Mémoire De Master Option Protection Des Végétaux, Université De Biskra. P. 67.

Brun, M., &Denieulle, J. (2023). *L'agriculture : talon d'Achille ou atout d'avenir du Nigeria ?* In *Le Déméter 2023* (pp. 219-234). IRIS éditions

. **Burke, M. J., Gusta, L. V., Quamme, H. A., Weiser, C. J., & Li, P. H., (1976).** *Freezing And Injury In Plants.* Annual Review Of Plant Physiology, 27, 507-528.

. **Caplan, L. A., (1988).** *Effects Of Cold Weather On Horticultural Plants In Indiana.* Purdue University Cooperative Extension Publication, No. Ho-203.

. **Dalezios, N. R., &Petropoulos, G. P., (2017).***Frost And Remote Sensing: An Overview Of Capabilities.*

. **Dhaliwal, (2008).** *Handbook Of Vegetable Crops.* Kalyani Publishers, Ludhiana, India. P. 389.

Djebbour, R., & Kebala, S., (2017). Effet d'un Fertilisant Biologique Sur La Qualité Et Le Rendement d'une Variété De Piment Cultivée Sous Serre. Mémoire De Master Spécialité: Gestion Qualitative Des Productions Agricoles, Université De Khemis Miliana. P. 77.

D.S.A., (2008). Direction Des Services Agricoles De La Wilaya De m'sila : Rapport Sur La Wilaya De m'sila. 12p.

FAO (2005) Frost protection: fundamentals, practice, and economics vol 1

F.A.O., (2019). Contribution A l'étude Des Ravageurs Insectes Des Cultures Maraichères Sous Serre Dans La Région De Biskra. Cas De Myzus Persicae (Hemiptera, Aphididae). Mémoire De Master Option Protection Des Végétaux, Université De Biskra. P. 67.

FAO. (2021). L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2021. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

FAO 2021 Food And Agriculture Organization & International Institute For Applied Systems Analysis., (2021). Global Agro Ecological Zones V4 (P. 32-33, 35)..

FAO ET IAASA(International Institute for Applied Systems Analysis) 2021 Fischer, G., Nachtergaele, F.O., van Velthuisen, H.T., Chiozza, F., Franceschini, G., Henry, M., Muchoney, D. and Tramberend, S. 2021. Global Agro-Ecological Zones v4 – Model documentation.

Fetayah, H., (2015). Étude Ethnobotanique Des Plantes Médicinales A Effets Cardiovasculaires De La Daïra De m'sila. Thème De Master Académique : Gestion De l'environnement. Université Mohamed Boudiaf De m'sila. 79p.

. Fondio, L., Kouamé, C., Djidji, A., Hortense, & Aidara, S., (2009). Bien Cultiver Le Piment En Côte d'Ivoire.

. Francisco Jose Gonzalez-Minero, (2018). The Plant List. Capsicum Annuum L.

. Hadbaoui, I., (2013). Les Parours Steppiques Dans La Région De m'sila: Quelle Gestion Pour Quel Devenir. Mémoire De Magister : Elevages En Zones Arides. Université KasdiMerbah- Ouargla. 139p.

. Hannan, J., (2019). Frost Protection In High-Density Orchards. Iowa State University Extension And Outreach.

. Heidi Young, (2022). Les Meilleurs Pays Producteurs De Piment Au Monde

. Heidorn, K. C., (2005). Frost Pockets.

. Hogg, W. H., (1971). Spring Frosts. Agriculture, 78(1), 28-31.

. Houerou, H.N., & Claudin, J., (1972). Carte Géologique De La Région d'el Hodna Au 500000. F.A.O. Cité Dans Lakehali, 2015.

. Kalma, J. D., Laughlin, G. P., Caprio, J. M., & Hamer, P. J. C., (1992). Advances In Bioclimatology, 2. The Bioclimatology Of Frost. Springer-Verlag.

- . **Levitt, J., (1980).** Responses Of Plants To Environmental Stresses (Vol. 1, 2nd Ed.). Academic Press.
- . **Lindow, S. E., Arny, D. C., Barchet, W. R., & Upper, C. D., (1978).** Bacterial Ice Nucleation Inhibitors And Reduction Of Frost Damage To Plants (Abstract). *Phytopathology News*, 12, 138.
- . **Magoura, C., & Chabira, K., (2019).** Mémoire De Master Académique : Inventaire Des Oiseaux Dans La Région De Boukhmissa (m'sila).
- . **Medvedeva, O., (2023).** Hiver, 6 Gestes Pour Protéger Son Jardin Du Froid.
- . **Mimeche, F., (2014).** Écologie Du Barbeau De l'algérie. *Luciobarbus Callensis* (Valenciennes, 1842) (Pisces: Cyprinidae) Dans Le Barrage d'el k'sob (m'sila). Thèse De Doctorat. École Nationale Supérieure d'agronomie, El-Harrach, Alger. 80p.
- . **Munich Re., Faust, E., & Herbold, J., (2018).** Spring Frost Losses And Climate Change.
- . **Myers, S. C., (1988).** Commodity Information - Small Fruit. In J. D. Gibson (Ed.), *Cold Weather And Horticultural Crops In Georgia: Effects And Protective Measures* (Pp. 15-20). University Of Georgia, Extension Horticulture Department, Public. No. 286.
- . **Oumane, S., (2019).** Enquête Sur La Culture De Piment Local Dans La Région De Biskra: Conduite Et Biodiversité. Mémoire De Master Option Production Végétale, Université De Biskra. P. 57.
- . **Perry, K. B., (1994).** Freeze/Frost Protection For Horticultural Crops. North Carolina State University Cooperative Extension, Horticulture Information Leaflet No. 705.
- . **Proebsting, E. L., Jr., & Mills, H. H., (1978).** Low Temperature Resistance Of Developing Flower Buds Of Six Deciduous Fruit Species. *Journal Of The American Society For Horticultural Science*, 103, 192-198.
- . **Ramade, F., (2003).** Éléments d'écologie. Écologie Fondamentale. 3ème Ed. Dunod, Paris. 690p.
- . **Ramade, F., (2008).** Dictionnaire Encyclopédique Des Sciences De La Nature Et De La Biodiversité. Édition :Dunod. 737p.
- . **Richardson, O., (2022).** Frosts And Vines In The United Kingdom. *Uk Vines*.
- . **Seo-Young, O., & Seok-Chan, K., (2019).** Horticultural Science And Technology: Fruit Development And Quality Of Hot Pepper (*Capsicum Annuum* L.) Under Various Temperature Regimes.
- . **Snyder, R. L., De Melo-Abreu, J. P., & World Meteorological Organization., (2005).** Frost Protection: Fundamentals, Practice, And Economics (Vol. I).
- . **Smith, P., & Jones, R. (2010).** *Plant Responses to Frost: Implications for Agriculture*. *Agricultural Research Journal*, 58(3), 145-162..

Smith, J., Johnson, A., & Brown, M. (2022). Environmental impacts of chemical frost protection methods in agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(15), 4678-4690.

Simcom. SIM900 GSM/GPRS Module Hardware Design. Retrieved from https://simcom.ee/documents/SIM900/SIM900_Hardware_Design_V2.01.pdf

. Song, H., Hu, Y., Lu, Y., Wang, J., Pan, Q., & Li, P., (2021). A Review Of Methods And Techniques For Detecting Frost On Plant Surfaces. *Sustainability*, 11(11), 1142.

. S.M.M., (2022). Station Météorologique De m'sila.

. Tongli, W., Andreas, H., David, L. S., & Trevor, Q. M., (2012). Climate data—High-Resolution Spatial Climate Data For Western North America. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, American Meteorological Society. P. 27.

. Ventskevich, G. Z., (1961). Agrometeorology. Translated From The Russian By The Israel Programme For Scientific Translation. (Original Work Published 1958).

. Wang, C. Y., & Wallace, H. A., (2003). Chilling And Freezing Injury. In K. C. Gross, C. Y. Wang, & M. Saltveit (Eds.), *The Commercial Storage Of Fruits, Vegetables, And Florist And Nursery Stocks* (USDA Handbook Number 66).

. Webb, L., & Snyder, R. L., (2013). Frost Hazards. In P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia Of Natural Hazards* (Pp. 363–366). Springer.

Wong, W. (2019). *Fundamentals of Liquid Crystal Displays – How They Work and What They Do*. Texas Instruments. Retrieved from <https://www.ti.com/lit/wp/szyu036/szyu036.pdf>

Yang, J., Gao, L., Liu, M., Sui, X., Zhu, Y., Wen, C., & Zhang, L., (2016). Advanced Biotechnology For Cell Cryopreservation.

Zitouni, D., & Douar, K., (2017). Étude Bioécologique De La Faune Auxiliaire Des Aphides De Poivron Sous Serre. Mémoire De Master Spécialité : Protection Des Cultures, Université De Mostaganem. P. 69.

ملخص :

في مواجهة تغير المناخ وآثاره الضارة على النباتات، تم تحديد الصقيع كعامل مناخي يصعب السيطرة عليه. ولتوفير حل لهذه المشكلة، حاولنا تطوير مضاد تجمد طبيعي متكامل مع نظام رش ذكي. تم اختبار المنتج الذي تم تطويره على نبات الفلفل الحار. قمنا بإعداد ثلاث تركيبات مختلفة قمنا بتطبيقها على أجزاء مختلفة من النباتات (كاملة، السيقان وأوراق الشجر). أظهرت النتائج أن التركيبة الثالثة التي تم رشها على كامل النبات كانت الأكثر فعالية في تمكين المحصول من مقاومة الصقيع. ومن ناحية أخرى فإن النباتات غير المعالجة (الضوابط) ذبلت تماماً وماتت الثقافة. تهدف هذه الدراسة إلى حماية المحاصيل من الصقيع وتحسين الإنتاجية وتقليل الفاقد. يعزز هذا التجمد الحيوي الزراعة المستدامة والصديقة للبيئة

الكلمات المفتاحية : التغيرات المناخية، الصقيع، مضاد صقيع طبيعي، نظام رش ذكي، نبات الفلفل الحار، الزراعة المستدامة، الزراعة البيئية

Résumé

Face aux changements climatiques et à leurs effets néfastes sur les plantes, le gel a été identifié comme un facteur climatique difficilement incontrôlable. Pour apporter une solution à ce problème, nous avons essayé de développer un antigel naturel intégré à un système de pulvérisation intelligent. Le produit élaboré a été testé sur la culture de piment. Nous avons préparé trois formulations différentes que nous avons appliquées sur diverses parties des plantes (entièrement, tiges et feuillage). Les résultats ont montré que la troisième formulation, pulvérisée sur l'ensemble de la plante, était la plus efficace pour permettre à la culture de résister au gel. En revanche, les plantes non traitées (témoins) se sont totalement fanées et la culture est morte. Cette étude vise à protéger les cultures du gel, à améliorer la productivité et à réduire les pertes. Cet bio-antigel favorise une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

Mots clés: Changement climatique, gel, bio-antigel, pulvérisation intelligente, piment, agriculture durable, environnement.

Summary

Faced with climate change and its adverse effects on plants, frost has been identified as a climatic factor that is difficult to control. To provide a solution to this problem, we tried to develop a natural antifreeze integrated with an intelligent spraying system. The developed product was tested on chilli crops. We prepared three different formulations that we applied to various parts of the plants (entirely, stems and foliage). The results showed that the third formulation, sprayed on the entire plant, was the most effective in enabling the crop to resist frost. On the other hand, the untreated plants (controls) completely withered and the crop died. This study aims to protect crops from frost, improve productivity and reduce losses. This bio-antifreeze promotes sustainable and environmentally friendly agriculture.

keywords: Climate changes, frost, natural anti-frost solution, smart spraying system, chili plants, sustainable agriculture, eco-friendly farming