

**Interreg
Sudoe**



**Co-funded by
the European Union**

An-Gel Sudoe

Cette publication ne reflète que les opinions de l'auteur.

La Commission européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans ce document.

Etat des lieux de la lutte contre le gel en France, en Espagne et au Portugal



An-Gel Sudoe

Projet	An-Gel Sudoe (S1/2.4/F0016). "Contrôle et avertissement de l'irrigation en cas de gel printanier dans l'agriculture et l'arboriculture".
Groupe de travail	Étude et définition de solutions durables
Activité	A.1.1. Étude de l'état de l'art au niveau transnational
Produit livrable	E.1.1.1. Rapport transnational sur l'état de l'art
Niveau de diffusion	Public
Date de validation	22/11/2024
Bénéficiaire responsable	Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries Àrea de Producció Vegetal Programa de Fructicultura
Bénéficiaires participant à l'activité	<ul style="list-style-type: none"> – Association Climatologique de la Moyenne-Garonne et du Sud-Ouest – Chambre d'Agriculture de la Dordogne – Invenio – NEIKER-Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario, S.A. Producción Protección Vegetal – Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental – Instituto Politécnico de Bragança Escola Superior Agrária – Comunidade Intermunicipal Viseu Dão Lafões – Hydrometeorological Innovative Solutions, S.L.

INDEX

A. Introduction	5
B. Études climatiques régionales et effets du changement climatique sur le gel	6
B.1. L'Europe	6
B.1.1. Europe. Risque de gelées printanières	6
B.1.2. Europe. Projections climatiques	7
B.2. Espagne	9
B.2.1. Espagne. Risque de gelées printanières	9
B.2.2. Espagne. Projections climatiques	9
B.2.3. Région de Murcie. Climatologie et projections de gel et de température	12
B.2.4. Pays Basque. Climatologie et projection des gelées et des températures	15
B.3. France.....	22
B.3.1. Moyenne-Garonne. Climatologie et prévisions de gel et de température	22
B.3.2. Dordogne. Climatologie et projections de gel et de température.....	29
B.3.3. Châtaigniers. Effets de la climatologie.....	35
B.4. Portugal.....	36
B.4.1. Nord-est du Portugal. Climatologie et projection des gelées et des températures	36
B.5. Conclusions.....	43
C. Épisodes de gel pertinents au cours des dernières années	45
C.1. Espagne	45
C.1.1. Région de Murcie.....	45
C.1.2. Pays Basque	46
C.1.3. Lleida.....	47
C.2. France.....	50
C.2.1. Sud-ouest de la France. Zone de culture de la châtaigne	50
C.2.2. Moyenne Garonne	50
C.1. Portugal.....	51
C.2. Annexes.....	52
C.2.1. Région de Murcie. Zonage du risque de gel.....	52
C.2.2. Région de Murcie. Études sur le gel.....	54
C.2.3. Pays Basque. Étude sur le gel dans la région	57
C.2.4. Lleida. Étude sur le gel dans la région.....	61
D. Principes du gel.....	63
D.1. Gels par rayonnement.....	63
D.2. Gels d'advection.....	65
D.3. Gels par évaporation.....	65
D.4. Mais la réalité est toujours plus complexe... ..	67

E. Systèmes de défense contre le gel	68
E.1. Protection passive contre le gel. Aspects généraux.....	68
E.1.1. Choix du site, des espèces et des variétés	68
E.1.2. Pratiques culturelles	69
E.1.3. France. Lutte passive sur le châtaignier	71
E.1.4. Portugal.....	72
E.2. Protection active contre le gel	73
E.2.1. Systèmes basés sur l'approvisionnement en eau	73
E.2.2. Systèmes basés sur le mouvement de l'air	75
E.2.3. Systèmes basés sur l'apport de chaleur	79
E.2.4. Estimations économiques	83
E.2.5. Considérations sur les systèmes de protection contre le gel	89
E.3. Protection chimique contre le gel	91
E.3.1. Introduction	91
E.3.2. Utilisation de produits chimiques pour la protection contre le gel	92
E.3.1. Conclusions	96
F. Aspects sociaux de la lutte contre le gel.....	101
F.1. Espagne	101
F.1.1. Pays Basque	102
F.1.2. Région de Murcie.....	102
F.1.3. Lleida.....	103
F.2. France.....	105
F.2.1. Moyenne-Garonne.....	105
F.2.2. La châtaigne	107
F.3. Portugal.....	109
G. Le rôle de l'assurance agricole dans la gestion des risques liés au gel	110
G.1. Espagne	110
G.2. France.....	113
G.3. Portugal.....	115
H. Conclusions et visions pour l'avenir des problèmes liés au gel	117
H.1. Espagne	117
H.2. Portugal.....	119
H.3. France.....	120

A. Introduction

An-Gel Sudoe est un projet dont l'objectif est de rassembler et d'élargir les connaissances sur l'occurrence des gelées printanières sur les arbres fruitiers et la vigne, leurs mécanismes d'action et les systèmes de lutte contre ces gelées dans différentes régions de France, d'Espagne et du Portugal.

Afin d'atteindre l'objectif spécifique proposé dans le projet, il est nécessaire de partager les connaissances actuelles sur le risque de gel en arboriculture et en viticulture, tant celles acquises par les partenaires et que celles obtenues en dehors du groupe, ainsi que l'éventail des solutions potentiellement applicables. Ainsi, sous la direction de l'IRTA et avec la participation de tous les partenaires, une étude préliminaire de l'état de l'art a été réalisée.

Dans un premier temps, on examine le problème actuel du gel dans chacune des zones de projet, avec les situations de risque actuelles, les épisodes les plus marquants de ces dernières années et la projection de l'évolution de l'incidence à la suite du réchauffement climatique.

L'étude prend en compte les spécificités des régions et des cultures concernées, afin d'adapter les solutions développées et d'assurer leur efficacité et leur validité dans le contexte des cultures représentatives du SUDOE, tant sur le plan agronomique qu'économique. Les solutions innovantes qui seront identifiées au préalable répondront cumulativement aux conditions d'efficacité, de rentabilité et de durabilité, y compris, entre autres, la micro-irrigation de haute précision, les techniques de gestion des sols, les systèmes de drainage par convection d'air froid, l'utilisation de haies brise froid, la taille tardive des vignes ou les mesures de réparation ou de sauvegarde après les gelées.

L'étude des techniques de lutte active contre gel comprend également une étude économique des principales solutions disponibles.

En outre, l'étude de l'état de l'art se concentre également sur le rôle de l'assurance agricole en tant qu'élément clé de la viabilité économique des producteurs lorsque des gelées importantes se produisent dans différents pays. Ces dernières années, les dégâts causés par le gel étant devenus plus fréquents et plus graves, le coût de l'indemnisation des assurés a considérablement augmenté, ce qui s'est traduit par une hausse des primes d'assurance payées par les agriculteurs. De leur côté, les administrations publiques, qui contribuaient auparavant à l'indemnisation des dommages subis par les agriculteurs, ont changé d'approche et préfèrent déléguer leurs fonctions au secteur privé de l'assurance.

L'étude porte également sur l'évaluation des aspects sociaux liés au gel et sur les méthodes utilisées pour le contrôler, en particulier lorsqu'il cause des désagréments à d'autres concitoyens.

Enfin, des conclusions sont tirées sur l'état de l'art en matière de gel et de lutte contre le gel, ainsi que sur les priorités de recherche pour faire face aux nouvelles situations qui apparaîtront dans le scénario changeant résultant des effets du changement climatique.

B. Études climatiques régionales et effets du changement climatique sur le gel

Cette section décrit les études sur la climatologie actuelle et historique dans les différents pays et régions impliqués dans le projet, ainsi que les prévisions de l'effet du changement climatique sur les gelées, en particulier celles qui se produisent tard au printemps.

B.1. L'Europe

B.1.1. Europe. Risque de gelées printanières

Les gelées de fin de printemps, qui surviennent après la germination des plantes herbacées et la pousse des plantes ligneuses, ont un impact écologique et économique majeur sur l'agriculture et la sylviculture dans les régions tempérées et boréales du monde. Les dommages causés par le gel aux organes vulnérables des plantes affectent considérablement la croissance, la santé, la compétitivité et les limites de distribution des plantes et, en Amérique du Nord et en Europe, causent plus de pertes économiques à l'agriculture que n'importe quel autre risque lié aux conditions météorologiques.

Bien qu'il soit difficile d'attribuer un seul épisode de gel au changement climatique, la fréquence et la gravité des dommages peuvent être amplifiées par la crise climatique. Ce qui s'est passé en 2021 peut illustrer la tendance des années à venir (Programme Copernicus, 2021) :

- Le printemps 2021 a été marqué par des températures record dans de nombreuses régions d'Europe à la fin du mois de mars. Ces conditions se sont poursuivies jusqu'au début du mois d'avril, semblant suivre le même schéma de début de printemps chaud que celui observé en Europe ces dernières années. Cependant, un changement dans la circulation atmosphérique a apporté une masse d'air froid, avec des températures inférieures à zéro dans une grande partie de l'Europe. Le mois d'avril 2021 a été le plus froid pour l'ensemble de la région depuis 2003. Il en a résulté des températures basses record un peu plus d'une semaine après que des températures élevées record aient été battues en mars. L'arrivée précoce de la chaleur printanière, qui a favorisé la croissance des cultures, rapidement suivie d'une gelée printanière tardive, a entraîné des répercussions locales sur certains secteurs agricoles.
- Au cours du mois de mars, des températures nettement supérieures à la moyenne ont été observées dans une grande partie de l'Europe. Le premier jour où les températures maximales quotidiennes ont atteint 15 °C s'est produit deux à trois semaines plus tôt que d'habitude, dans une zone qui s'étend du Royaume-Uni et de l'Irlande à l'Europe centrale et aux Balkans, en passant par l'ouest et le nord de la France. Cette période chaude a été de longue durée. Dans la plupart des régions de France, dans certaines parties de l'ouest de l'Allemagne et dans de nombreuses régions du sud du continent, la température maximale quotidienne a été d'au moins 10 °C pendant plus de dix jours. Ces conditions peuvent être utilisées comme indicateur du débourrement de la végétation.
- Pour de nombreuses régions chaudes, ces longues périodes de températures élevées ne sont pas rares. Toutefois, pour la France, certaines régions du sud du Royaume-Uni et de l'Irlande, le sud de l'Allemagne et certaines régions des Balkans, la vague de chaleur du début du printemps 2021 a été exceptionnellement longue. La période chaude s'est terminée brusquement, avec un déplacement d'air froid sur une grande partie de l'Europe au début du mois d'avril. Ce changement dans la circulation atmosphérique a

été provoqué par un vaste et puissant système de haute pression centré sur le nord de la Scandinavie.

- Le contraste entre un mois de mars doux et un mois d'avril froid a été observé dans de nombreuses régions d'Europe. Dans certains cas, des températures record ont été observées en mars, comme 25,5 °C à Sankt Andrä/Lavanttal (Carinthie) en Autriche, ou 24,8 °C à Beauvais (Hauts-de-France), une semaine seulement avant la chute des températures. À Müllheim (Baden-Württemberg) en Allemagne, un maximum de 25,9 °C a été enregistré quelques jours avant que les conditions ne changent. Si une journée de gelée légère en avril est fréquente et se produit presque chaque année dans le nord-ouest et le centre de l'Europe, des températures aussi basses que celles enregistrées au début du mois d'avril 2021 sont rares ; à Agen la température minimale sous abri a été de -2.4°C le mercredi 7/04/2024 en baisse de 9.4°C par rapport à la veille et il n'était pas tombé une goutte de pluie depuis dix-neuf jours ce qui avait asséché les sols superficiels, notamment ceux qui étaient enherbés.
- La dernière gelée du printemps 2021 a été non seulement sévère, mais aussi plus tardive que la moyenne. Au cours du mois d'avril, une grande partie de l'Europe au nord de la péninsule ibérique a enregistré des températures inférieures à -2°C. Cela représente un retard de deux à trois semaines par rapport à la moyenne de la période de référence 1991-2020.

Zohner et al. (2020) ont analysé les gelées printanières tardives entre 1959 et 2017 et les stratégies de résilience des espèces ligneuses afin de prédire la vulnérabilité des forêts au changement climatique. Les données sur la phénologie des feuillus et la résistance au gel des feuillus provenaient de près de 1500 espèces cultivées dans des jardins communs. L'augmentation la plus importante des gelées printanières endommageant les feuillus s'est produite en Europe et en Asie de l'Est, où les espèces sont plus vulnérables aux gelées printanières qu'en Amérique du Nord. Les données indiquent que 35% des forêts européennes sont de plus en plus menacées par les dégâts causés par le gel. Par conséquent, les stratégies d'adaptation à la phénologie et au climat qui ont permis aux arbres de tolérer le gel dans le passé seront de moins en moins adaptées aux conditions climatiques futures.

B.1.2. Europe. Projections climatiques

Le changement climatique peut entraîner une modification des schémas et une augmentation de l'incidence des événements extrêmes, et a déjà déclenché des avancées dans la phénologie printanière des plantes (par exemple, le déploiement des feuilles au printemps a été avancé de près de deux semaines entre 1982 et 2011 en Europe occidentale, -Fu et al., 2014-), et cette tendance devrait se poursuivre tout au long du 21ème siècle. Depuis le milieu des années 1980, un débat a lieu pour savoir si la fréquence et la gravité du gel, et donc le risque de dommages causés par le gel dans les climats tempérés, augmenteront ou diminueront au cours des prochaines décennies. L'augmentation des températures de l'air due au changement climatique a généralement réduit le nombre total de jours de gel par an et allongé la période sans gel. D'autre part, il n'y a pas de consensus sur le fait que l'occurrence et la gravité des gelées de printemps diminueront en raison du réchauffement climatique.

Avec le réchauffement climatique, il est incontestable que le débourrement de la végétation après le repos hivernal se produit de plus en plus tôt en Europe. Aujourd'hui, la saison de croissance des vignes commence 15 à 20 jours plus tôt que dans les années 1980 (Leolini et al., 2018). Si le démarrage plus précoce de la saison de croissance peut avoir certains effets positifs

(la saison de croissance est prolongée et le risque de stress hydrique au cours des mois d'été diminue), il signifie également que l'exposition de la production végétale aux gelées printanières est avancée.

En ce qui concerne les projections climatiques, en Allemagne, une avance de 28 à 31 jours dans le débourrement est estimée pour la fin de ce siècle, par rapport à la situation actuelle dans le cadre d'un scénario de changement climatique de haut niveau pour toutes les variétés de raisin considérées. En Espagne, ce changement estimé du débourrement est de 7 à 11 jours. L'avance estimée de la floraison printanière est légèrement inférieure à l'avance du débourrement, le changement le plus important étant observé en France : jusqu'à 18-21 jours d'ici à la fin du siècle dans le cadre du scénario de changement climatique de haut niveau.

Certaines études montrent que la fréquence et la gravité des nuits froides de printemps changent également, notamment en raison de la probabilité accrue d'invasions d'air froid (voir par exemple Huang et al. 2021).

Olschewski et al. (2024) ont étudié le stress de la végétation lors d'événements extrêmes induits par le changement climatique et, entre autres résultats, ont montré une augmentation potentielle de la fréquence des gelées de fin de printemps pour de vastes zones du bassin méditerranéen, affectant particulièrement les zones où il y a eu des périodes antérieures de réchauffement disproportionné causées par des changements dans le comportement des phases chaudes et froides de la circulation atmosphérique. Des épisodes de gel causant des dommages importants sont attendus principalement dans des conditions de haute pression et de flux de vent de nord-est poussant des masses d'air polaire sur le continent qui ne peut les humidifier suffisamment ce qui autorise de fortes pertes par rayonnement thermique. Au contraire lorsque ces descentes froides sont de nord-ouest, elle se chargent en humidité sur l'océan et la plus forte nébulosité réduit les pertes par rayonnement.

B.2. Espagne

B.2.1. Espagne. Risque de gelées printanières

Très peu d'études traitent spécifiquement du risque de gel à la fin du printemps en Espagne, mais une analyse complète du régime de gel dans la péninsule ibérique a été réalisée par García-Martín et al. (2021). Ils ont utilisé les données quotidiennes de 68 stations météorologiques appartenant à l'European Climate Assessment and Dataset (1975-2018) pour réaliser une étude spatio-temporelle du régime de gel. Les variables calculées comprenaient la probabilité de trois types de gel en fonction de leur gravité, les jours de gel, la température minimale absolue moyenne annuelle, le premier jour de gel, le dernier jour de gel et la période sans gel. Ces variables ont été intégrées dans un système d'information géographique, qui a permis la visualisation graphique de leurs caractéristiques à l'aide de techniques d'interpolation géostatistique (krigeage). Les changements dans les variables de gel ont été étudiés à l'aide du test de Mann-Kendall et de l'estimateur de pente de Sen. Les conclusions sont les suivantes :

- On observe une réduction généralisée du nombre de gelées par an (valeurs de gelées comprises entre -0,04 et -0,8 jour par an), ainsi qu'une augmentation de la température minimale absolue moyenne (valeurs comprises entre 0,04 et 0,10 °C par an), avec des tendances significatives très élevées sur l'ensemble du territoire.
- La réduction du nombre de gelées est plus prononcée en altitude. Les dates de gel varient fortement en fonction des caractéristiques orographiques de la période d'enquête.
- La tendance générale est à un retard significatif des gelées d'automne (valeurs comprises entre 0,4 et 1,06 jour/an), ainsi que des gelées printanières précoces (entre -0,429 et -1,29 jour/an), et en conséquence d'une période sans gel plus longue, tous les changements étaient beaucoup plus marqués que ceux observés dans d'autres régions du monde.
- Ces effets du changement climatique doivent être atténués en modifiant les espèces, les variétés et les techniques de culture afin de garantir une agriculture durable.

En 2023, les mêmes chercheurs (García-Martín et al, 2023) ont mené une autre étude avec un ensemble de données plus important (1975-2020) et davantage axée sur les effets dans les principales régions fruitières d'Espagne. Pour évaluer les tendances (1975-2020), les données quotidiennes de six stations météorologiques situées dans les principales zones de production fruitière de la période de recherche ont été utilisées. Les variables analysées sont la température minimale absolue moyenne annuelle et le dernier jour des gelées de printemps. Les résultats ont montré :

- Augmentation de la température minimale absolue moyenne (valeurs comprises entre 0,06 et 0,10°C par an), avec des tendances significatives très élevées en Murcie et à Séville.
- Les dates moyennes de gel varient considérablement en raison des caractéristiques orographiques et de la variabilité interannuelle de notre climat, mais la tendance générale et significative est celle d'un gel précoce au début du printemps (entre 0,48 et 1,30 jour) et, par conséquent, d'un risque plus élevé de dommages pendant la floraison.

B.2.2. Espagne. Projections climatiques

En Espagne, l'Agence météorologique nationale a publié en 2017 un Guide des scénarios régionalisés de changement climatique en Espagne, basé sur les résultats du GIEC-AR5. Ce

document propose une section spécifique dédiée au nombre de jours de gel (jours avec une température minimale inférieure à 0°C) en Espagne en tenant compte des scénarios de changement climatique. L'évolution de cet indice est étroitement liée au comportement de la température minimale pendant les mois froids. Pour l'Espagne péninsulaire, une diminution du nombre de jours de gel est attendue avec une évolution similaire pour tous les scénarios jusqu'en 2050, et une diminution plus prononcée pour le scénario le plus émissif vers 2060.

Si l'on se concentre sur les différents bassins fluviaux, les diminutions les plus importantes sont attendues dans le bassin du Duero, suivi par le bassin de l'Ebre, où la période hivernale concentre la perte de jours de gel. À la fin du siècle, au printemps, les bassins du Duero et de l'Èbre enregistrent à nouveau la diminution la plus importante, entre 10 et 20 jours, par rapport au reste des bassins, qui devraient avoir entre 1 et 5 jours de gel en moins.

Selon les données de l'Agence météorologique espagnole (AEMET), une augmentation d'environ 1,3°C des températures moyennes a été observée au cours des 70 dernières années en Espagne (Figure 1).

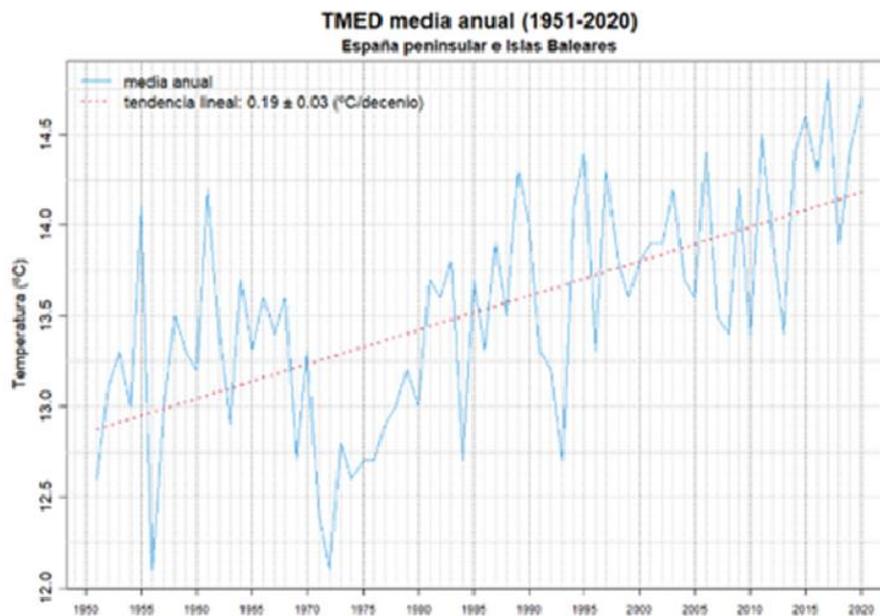


Figure 1 : Température annuelle moyenne en Espagne pour la période 1951-2020 (AEMET, 2021).

Dans son *"Rapport sur l'état du climat en Espagne 2021"*, elle indique que les températures moyennes annuelles ont augmenté régulièrement, sept des dix années les plus chaudes ayant été enregistrées au cours de la dernière décennie, à l'exception de l'année 2022. Dans l'ensemble, la température moyenne a augmenté d'environ 0,19 °C par décennie dans la péninsule. Cette augmentation de la température moyenne a entraîné une augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes liés aux températures élevées. Par exemple, les vagues de chaleur au cours de la décennie 2011-2020 ont doublé par rapport aux décennies précédentes (Figure 2).

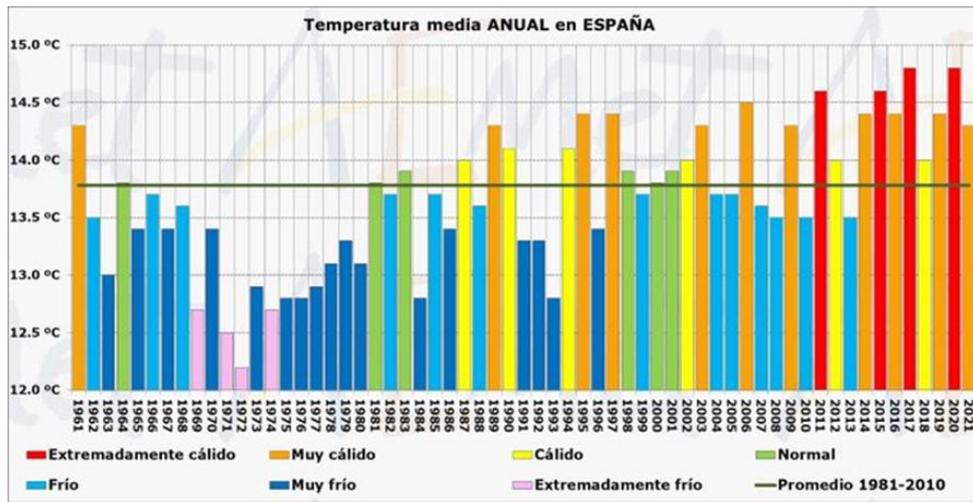


Figure 2 : Température annuelle moyenne en Espagne pour la période 1961-2021 (AEMET, 2021).

Par conséquent, une "faible augmentation" de la température moyenne peut entraîner des événements extrêmes plus fréquents et plus étendus (Figure 3).

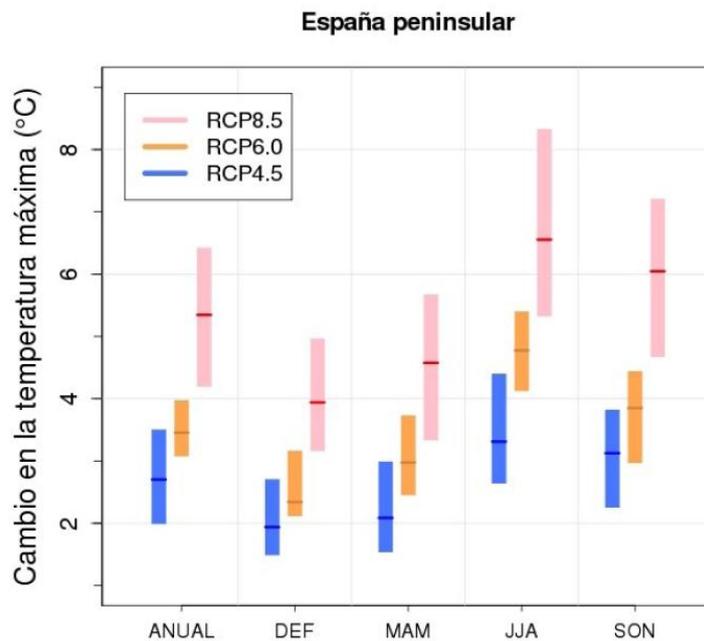


Figure 3 : Évolution des valeurs moyennes annuelles et saisonnières (trimestrielles) de la température maximale en Espagne péninsulaire pour les différents scénarios d'émissions (RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) pour la période 2081-2100. La barre centrale indique la médiane des projections et la barre l'intervalle entre les 17e et 83e percentiles (Sanz, M.J. et Galán, E. (Eds.), 2020).

Le nombre de jours de gel est le nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0°C au cours d'une période donnée. La variation de cet indice est étroitement liée au comportement des températures minimales au cours des mois les plus froids. Pour l'Espagne péninsulaire, une diminution du nombre de jours de gel est observée à l'échelle annuelle (AEMET, 2021) avec une évolution très similaire entre les scénarios jusqu'en 2050 et une diminution plus prononcée pour le scénario le plus émissif. Par communauté autonome, pratiquement aucun changement n'est observé dans les deux archipels; les variations seront plus faibles dans les régions du nord, Valence et Murcie, qui sont toutes des zones côtières avec peu de jours de gel. Cela indique qu'à la fin du siècle, l'apparition de ce phénomène dans ces régions sera extrêmement rare. En revanche, les changements les plus importants auront tendance à se produire en Castille et Léon et en Aragon (Figure 4).

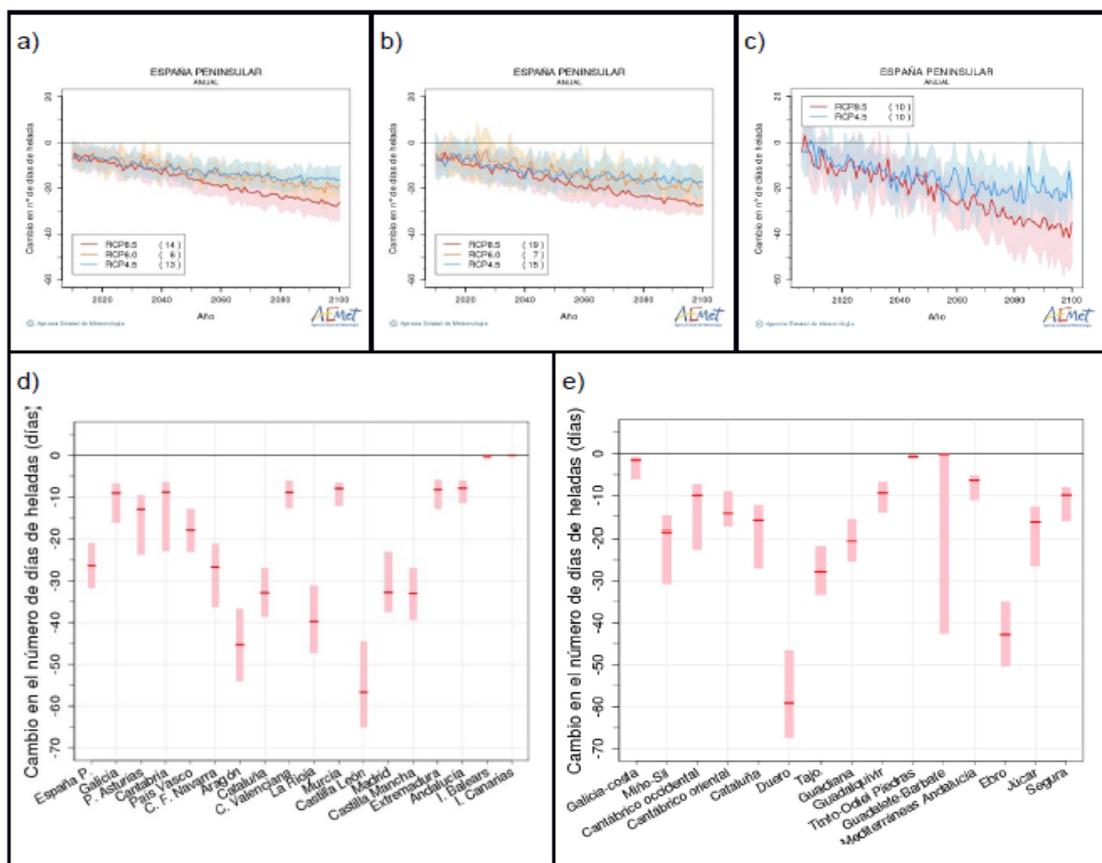


Figure 4 : Évolution des valeurs moyennes du nombre de jours de gel en Espagne continentale et dans les différentes communautés autonomes pour les différents scénarios d'émissions (Sanz, M.J. et Galán, E. (Eds.), 2020).

B.2.3. Région de Murcie. Climatologie et projections de gel et de température

Selon une étude scientifique réalisée par des chercheurs du Laboratoire climatique de l'Université d'Alicante et de l'Observatoire de la durabilité, le réchauffement climatique a provoqué une augmentation des températures allant jusqu'à 1,5°C dans des communautés telles que la Région de Murcie et la Communauté valencienne depuis 1950. Plus précisément, dans les zones urbaines telles que Murcie, on a observé une augmentation de la température de 1,6 °C (Figure 5), tandis que dans les zones rurales de Murcie, la valeur atteint 1,2°C.

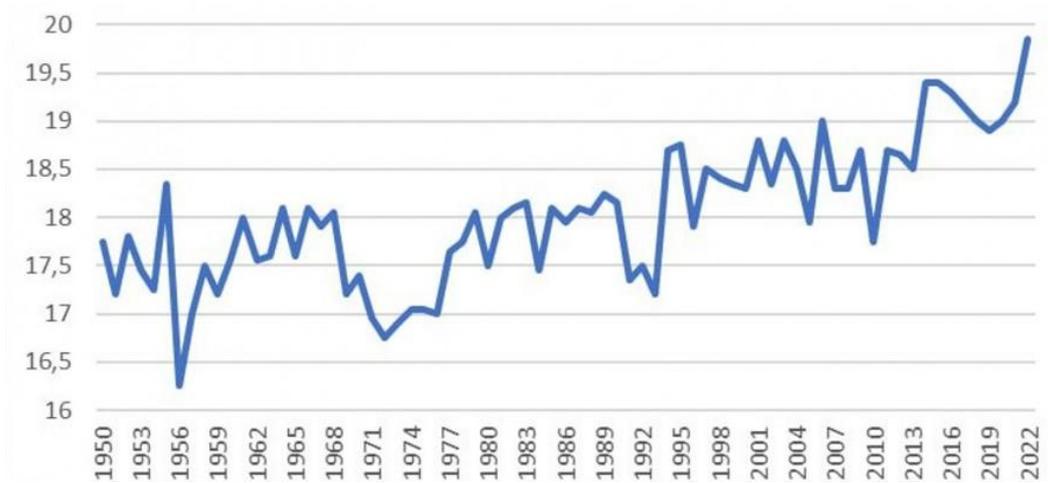


Figure 5 : Température annuelle moyenne en Murcie pour la période 1950-2022 (AEMET, 2023).

Cette étude conclut également que la majeure partie du réchauffement observé dans les observatoires urbains a affecté les températures minimales, avec une augmentation de 2°C entre 1950 et 2022. Cette augmentation de la température a été beaucoup plus marquée au cours des 40 dernières années (1984-2022), comme le montre la Figure 6.

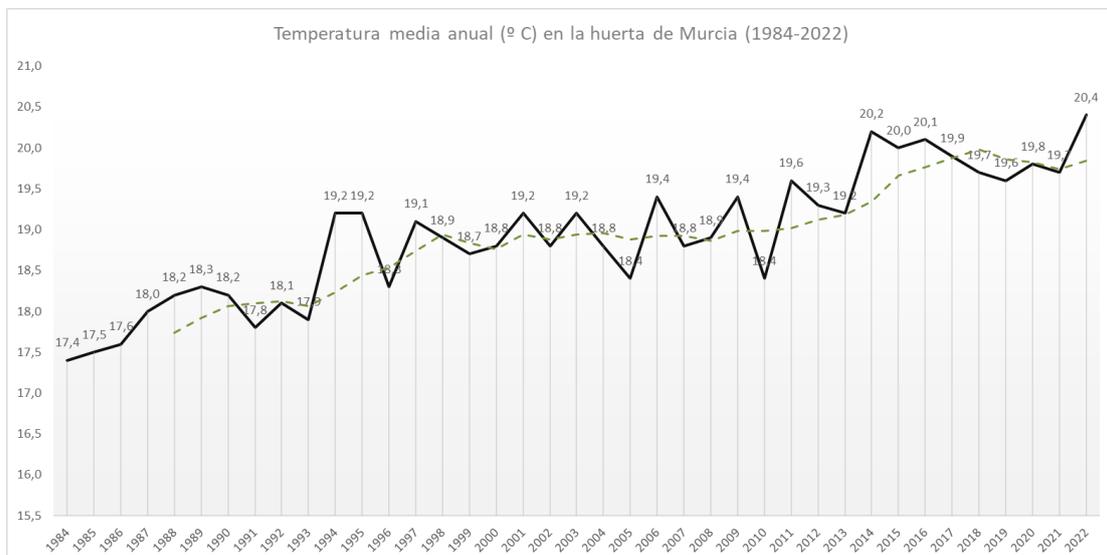
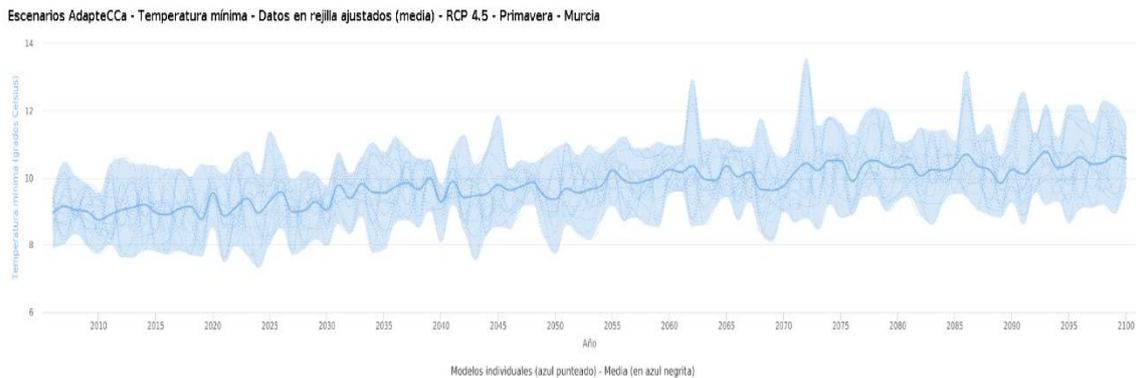


Figure 6 : Température annuelle moyenne de Murcie pour la période 1984-2022 et moyenne mobile sur 5 ans.

D'autre part, le Copernicus Climate Change Service (C3S) a récemment confirmé que "2023 est l'année la plus chaude jamais enregistrée". Dans le cas de la région de Murcie, la température moyenne a augmenté de 2°C par rapport à la dernière série historique. La variation de 2023 par rapport à la moyenne 1981-2022 place la région de Murcie parmi les six provinces espagnoles où l'augmentation est la plus forte. Les données de l'AEMET confirment que 2023 entrera dans les quatre années les plus chaudes en Espagne, avec 2017, 2020 et 2022. En Europe, l'année dernière

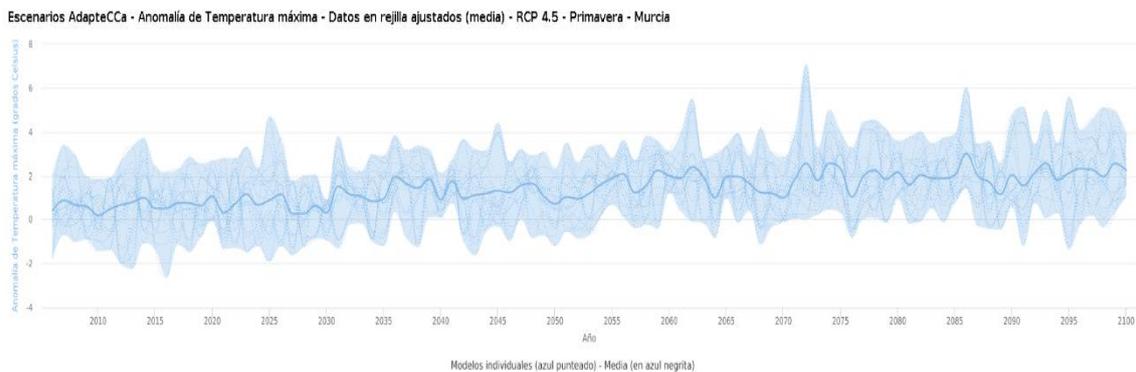
a été la deuxième année la plus chaude, avec 1,02 °C de plus que la moyenne 1991-2020 et seulement 0,1 °C de moins que 2020, l'année la plus chaude jamais enregistrée.

Les projections du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour la région de Murcie indiquent que les températures continueront d'augmenter à l'avenir en raison du réchauffement de la planète (Figure 7) et (Figure 8). Les températures printanières minimales subiront également une augmentation, qui peut être analysée pour les différentes régions espagnoles grâce à l'application du projet Adaptateca (<https://escenarios.adaptecca.es/>).



Fuente: <https://escenarios.adaptecca.es>

Figure 7 : Température minimale de printemps en Murcie dans le scénario RCP 4.5.



Fuente: <https://escenarios.adaptecca.es>

Figure 8 : Anomalie de température maximale au printemps en Murcie dans le scénario RCP 4.5.

B.2.4. Pays Basque. Climatologie et projection des gelées et des températures

Les scénarios climatiques régionaux constituent une information de référence de nature transversale pour les études ultérieures de l'impact du changement climatique sur différents secteurs, tels que la santé, l'agriculture, les ressources hydriques, l'environnement naturel, etc., dans le but d'identifier les meilleures mesures d'adaptation au changement climatique. Au Pays basque, un outil spécifique a été développé pour obtenir des projections climatiques dans différents scénarios d'émission. Ces informations sont disponibles via le lien web suivant :

http://escenariosklima.ihobe.eus/#&model=multimodel&variable=tas&scenario=rcp85&temporalFilter=YEAR&layers=MUNICIPALITIES&period=MEDIUM_FUTURE&anomaly=RAW_VALUE

Les scénarios climatiques présentés dans cet outil fournissent des données sur les variables de base (températures et précipitations) jusqu'à l'année 2100 avec une haute résolution spatiale (1km x 1km), et temporelle (données journalières), ainsi que des indicateurs dérivés de ces deux variables (vagues de chaleur, nuits tropicales, jours de gel...). Toutes ces informations ont été incluses dans un système d'information géographique qui permet de :

- Visualiser ces variables (température, précipitations, etc.) pour la période de référence historique (1971-2000), le futur proche (2011-2040), le futur moyen (2041-2070) et le futur lointain (2071-2100).
- Analyser et extraire les informations susmentionnées au moyen de recherches dans des zones spécifiques, qui peuvent être une commune déterminée, une région, un quartier, des zones d'intérêt environnemental... Il existe différents types de recherches prédéfinies, ainsi que la possibilité de dessiner une figure sur la carte (polygone) sur laquelle extraire l'information.
- Visualiser et télécharger des séries chronologiques de données, par année ou par station, qu'il s'agisse de moyennes annuelles ou de données journalières.

Toutes ces informations sont disponibles, dans le cas de données futures, à la fois pour la moyenne des différents modèles et pour chacun des modèles individuels.

Voici quelques graphiques de l'évolution des variables météorologiques d'intérêt pour le projet An-Gel Sudoe au cours des 68 dernières années. Les données proviennent de la station météorologique Arkaute située près de Vitoria-Gasteiz. Dans ce cas, il s'agit de données provenant d'une station fixe. Toutefois, grâce à l'outil susmentionné, des données ont également pu être extraites dans le passé, depuis 1971, avec une résolution de 1 km. Les deux derniers graphiques présentés ici combinent les données historiques de la station Arkaute jusqu'en 2023 avec les projections climatiques jusqu'en 2053 obtenues à l'aide de l'outil susmentionné pour 12 modèles climatiques différents (selon la méthodologie suivie par le GIEC).

La Figure 9 montre l'évolution de la température moyenne annuelle à Arkaute de 1955 à 2023, ainsi que les moyennes des 5 dernières années précédentes et les moyennes des 30 dernières années précédentes. Ce dernier paramètre montre une augmentation de presque 1°C de la moyenne sur 30 ans de 1985 à 2023, qui peut être divisée en deux phases: une augmentation plus lente de 0,5°C de 1984 à 2013, et une augmentation beaucoup plus rapide de 0,4°C au cours des 10 dernières années.

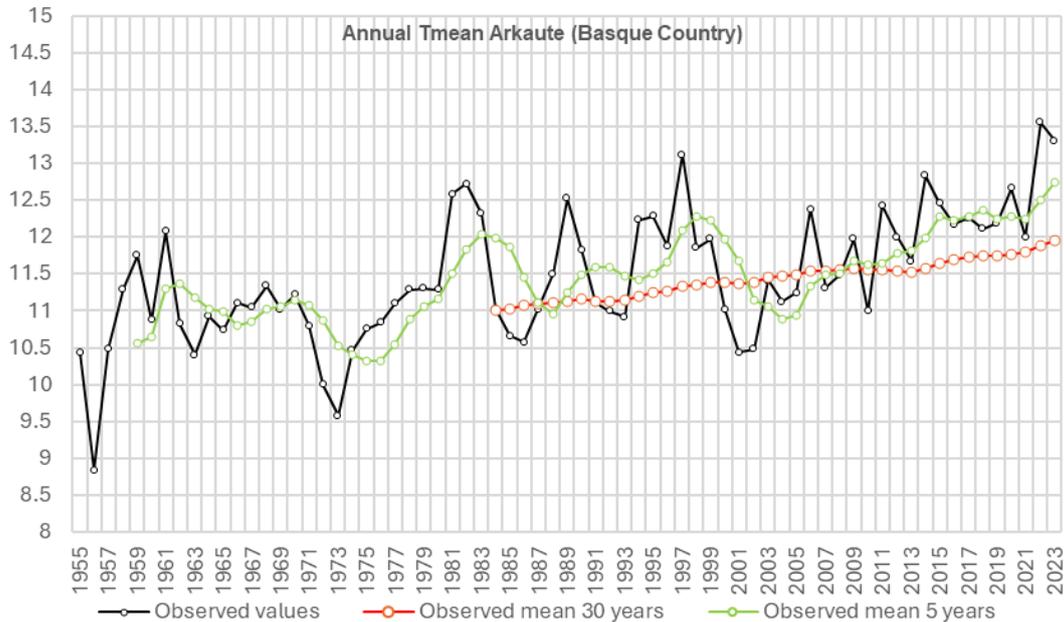


Figure 9 : Évolution de la température moyenne annuelle (°C) à la station d'Arkaute (ligne noire). Température moyenne des 5 dernières années (ligne verte) et moyenne des 30 dernières années (ligne rouge).

La Figure 10 montre l'évolution de la température minimale absolue et des températures minimales absolues moyennes et minimales des 30 dernières années (°C) pour le mois d'avril depuis 1955 à la station météorologique d'Arkaute. La température minimale absolue montre une certaine stabilité des valeurs de 1984 à 2003, et une augmentation des températures minimales absolues en avril d'environ 0,6 °C au cours des 20 dernières années.

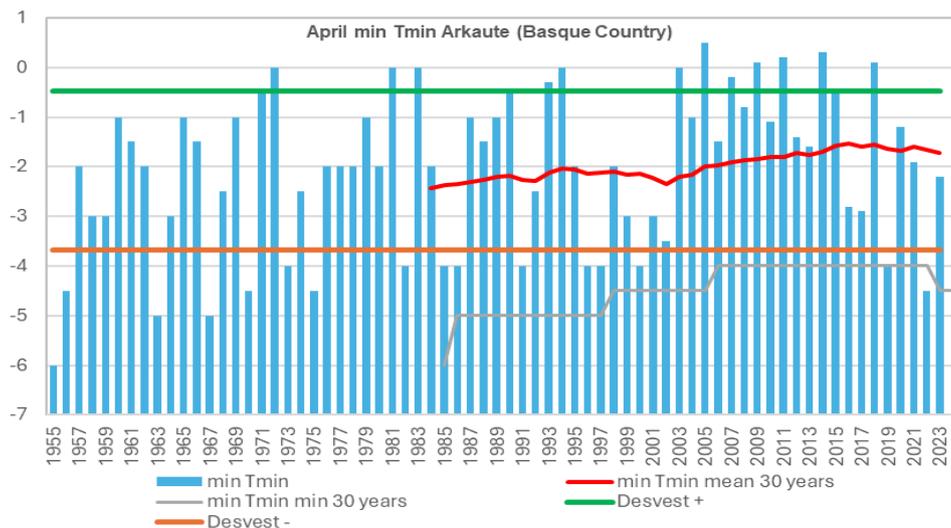


Figure 10 : Évolution de la température minimale absolue (°C) en avril depuis 1955 à la station Arkaute (barres bleues). Moyenne des températures minimales absolues en avril au

cours des 30 dernières années (ligne rouge). Températures minimales absolues au cours des 30 dernières années (ligne grise).

La Figure 11 montre l'évolution de la température moyenne (°C) des mois de février et mars depuis 1955 à la station météorologique d'Arkaute (barres orange). L'analyse de la série de valeurs sur 30 ans (ligne violette) montre une certaine stabilité des valeurs de 1984 à 2003, et une augmentation des températures moyennes de février et mars d'environ 0,6°C de 1984 à 2023.

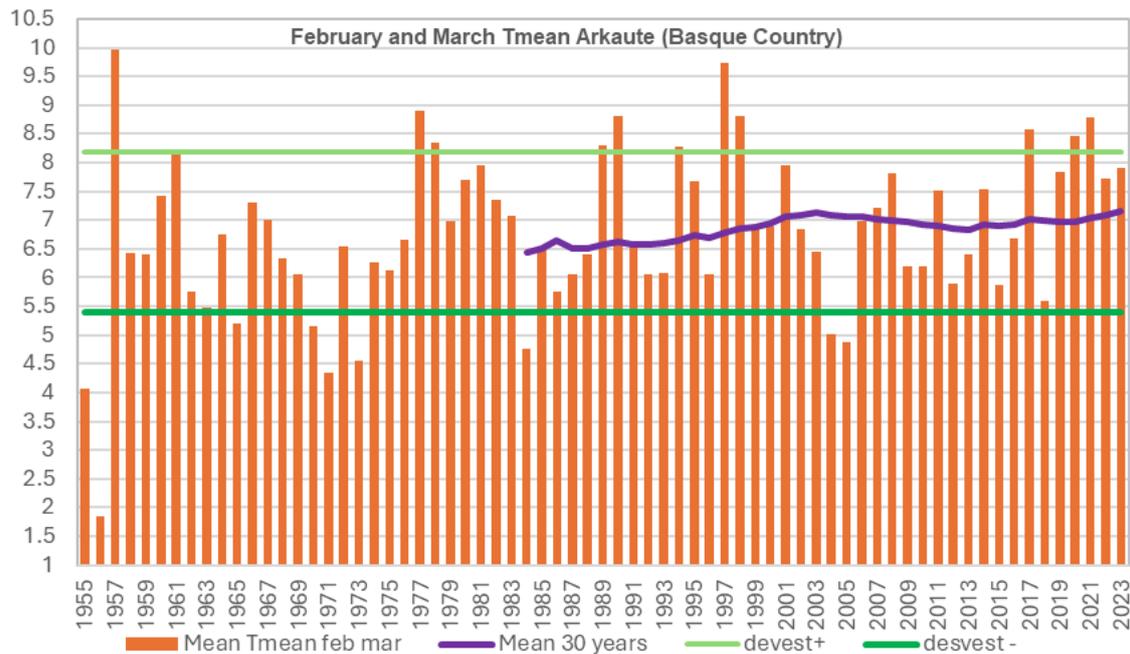


Figure 11 : Évolution de la température moyenne (°C) des mois de février et mars depuis 1955 à la station météorologique d'Arkaute (barres orange). Température moyenne des 30 années précédentes (ligne violette).

L'évolution des jours de gel printanier depuis 1955 à la station météorologique d'Arkaute est présentée dans la Figure 12 (barres bleues). La ligne jaune représente le nombre moyen de jours de gel printanier (moyenne des 30 années précédentes). On observe une réduction d'environ 2 jours de la moyenne sur 30 ans du nombre de jours de gel printanier entre 1984 et 2017. Toutefois, au cours des six dernières années, on a observé une légère augmentation de cette moyenne (sur 30 ans) d'environ 0,5 jour. Depuis 1984, le nombre moyen de jours de printemps a donc diminué de 1,5 jour.

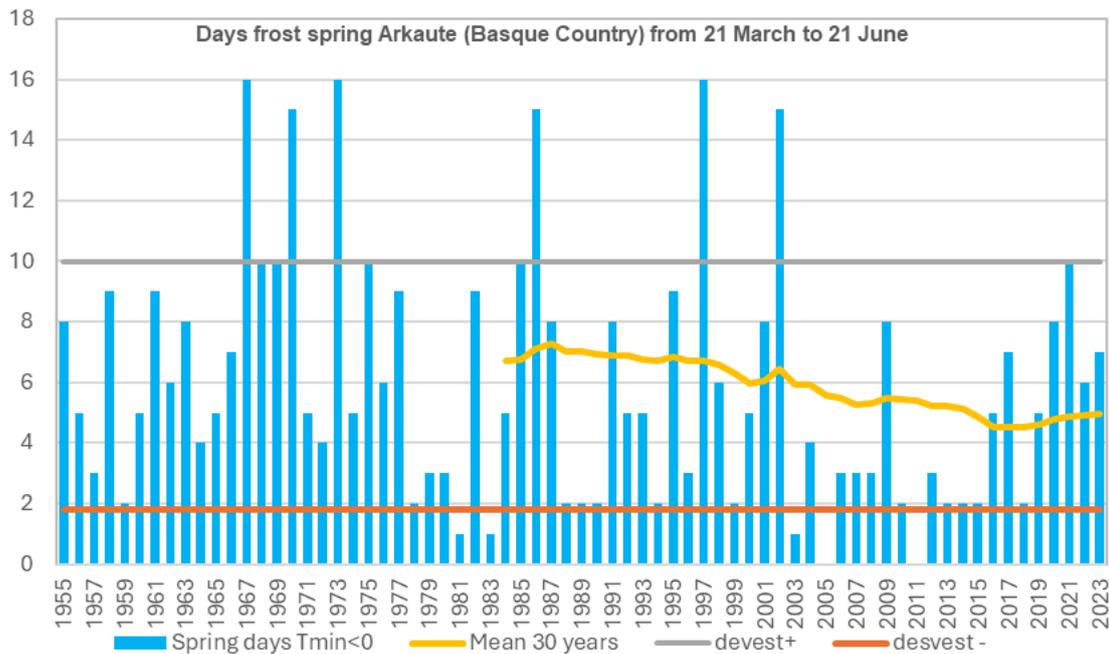


Figure 12 : Évolution du nombre de jours de gel (barres bleues) et du nombre moyen de jours de gel au cours des 30 dernières années (ligne jaune) au printemps depuis 1955 à la station météorologique d'Arkaute.

La Figure 13 et la Figure 14 représentent les séries historiques de la température annuelle moyenne et des jours de gel printanier de 1955 à 2023 à Arkaute, combinées aux projections climatiques de ces données pour cette même station jusqu'en 2053. Sur la base des résultats de 12 modèles de projection climatique obtenus à l'aide de l'outil susmentionné (selon la méthodologie suivie par le GIEC) (lignes grises dans les graphiques), les lignes représentant les moyennes sur 30 ans de la température annuelle moyenne et des jours de gelée de printemps ont été prolongées jusqu'en 2053. Pour projeter ces tendances sur 30 ans, les moyennes des 12 modèles de projection climatique utilisés ont été utilisées. Le scénario d'émissions choisi pour ces projections est le RCP 4.5. La Figure 13 montre une augmentation possible de 0,85 °C des moyennes trentenaires de la température moyenne annuelle de la station d'Arkaute au cours des 30 prochaines années. D'autre part, en ce qui concerne l'évolution du nombre de jours de gel printanier au cours des 30 prochaines années, aucune variation significative n'est observée au cours des 30 prochaines années sur la base de la série de moyennes sur 30 ans projetées jusqu'en 2053 (Figure 14).

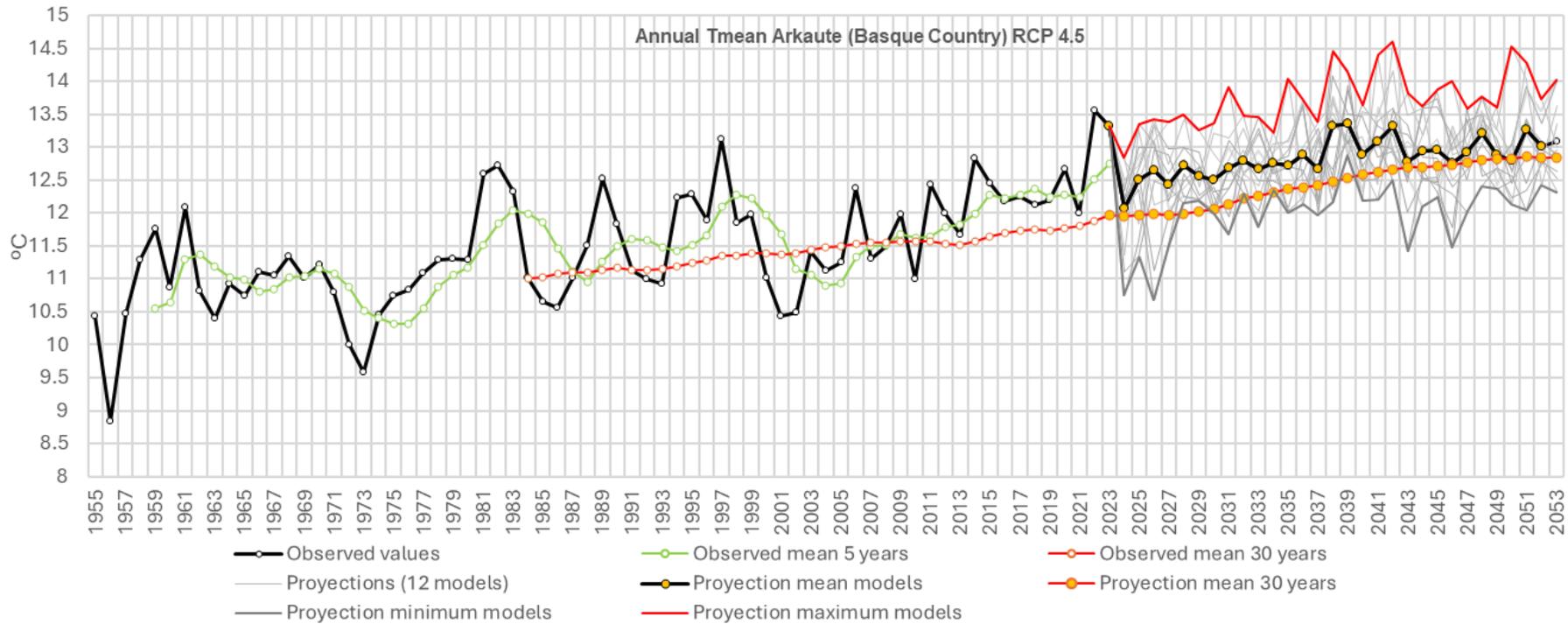


Figure 13 : Valeurs observées de la température annuelle moyenne (°C) entre 1955 et 2023 (ligne noire), moyenne sur 5 ans (ligne verte), moyenne sur 30 ans (ligne rouge) et projection de l'évolution de la température annuelle moyenne (ligne grise) et de la moyenne sur 30 ans (ligne rouge avec points jaunes) jusqu'en 2053 à la station météorologique d'Arkaute.

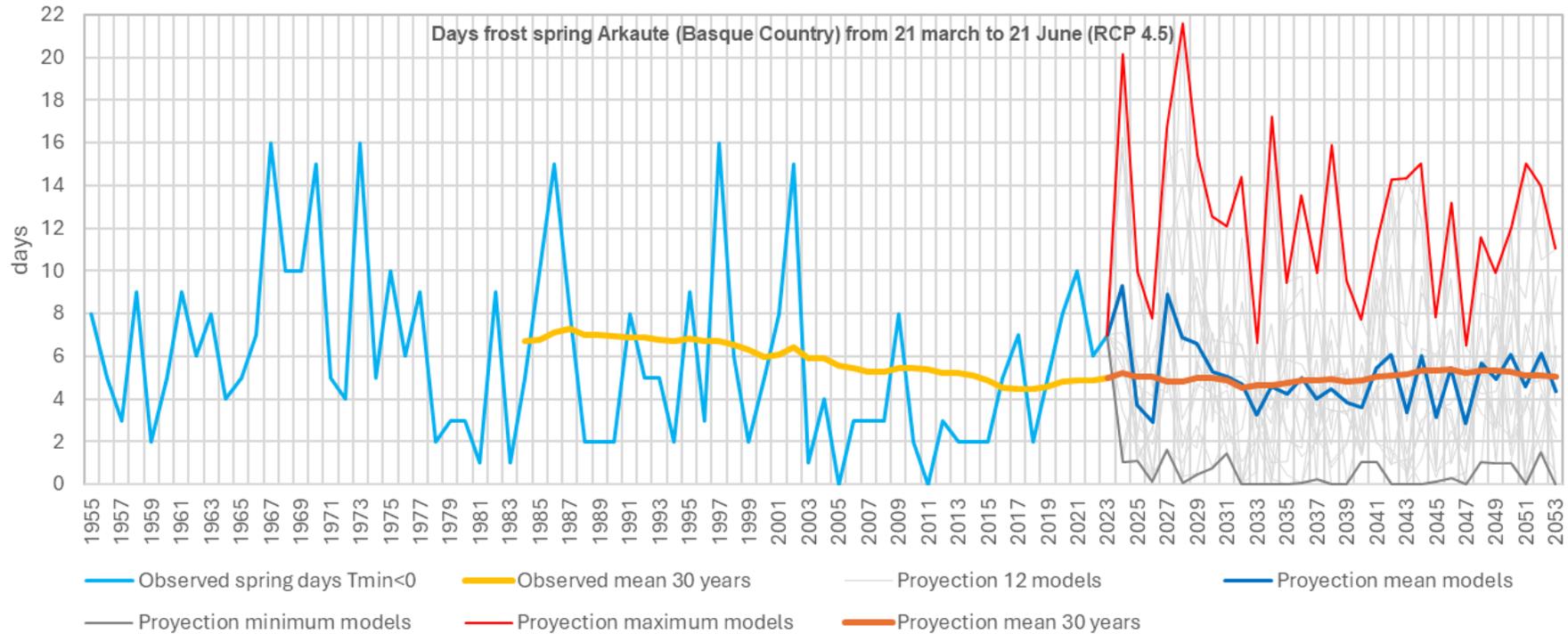


Figure 14 : Valeurs observées du nombre de jours de gel au printemps entre 1955 et 2023 (ligne bleue), moyenne sur 30 ans (ligne jaune) et projection de l'évolution du nombre de jours de gel (ligne rouge) et de la moyenne sur 30 ans (ligne orange) jusqu'en 2053, à la station météorologique d'Arkaute.

Il serait nécessaire de réaliser une étude plus approfondie pour entrevoir les effets possibles du changement climatique dans la zone où se trouve la station d'Arkaute en termes d'incidence des gelées de printemps. Les graphiques présentés montrent que l'augmentation prévue des températures moyennes annuelles jusqu'en 2053 (0,85 °C) pourrait accélérer le développement phénologique de certaines cultures et les rendre plus sensibles au gel (il n'y a pas de tendance claire en termes de réduction du nombre de jours de gel au printemps). Cependant, les températures minimales absolues ont augmenté au cours des dernières années, de sorte que, bien que les données de projection future ne soient pas présentées, il est possible de penser que cette tendance pourrait se maintenir, de sorte que ce fait pourrait avoir un effet moindre sur les tissus végétaux lorsque ces épisodes de gel se produisent. La combinaison d'une plus grande sensibilité due à l'accélération du développement phénologique associée à l'augmentation des températures moyennes annuelles et d'un impact moindre des épisodes de gel en raison de l'augmentation des températures minimales absolues ne permet pas de tirer des conclusions claires.

B.3. France

B.3.1. Moyenne-Garonne. Climatologie et prévisions de gel et de température

B.3.1.1. Introduction

Nous avons utilisé toutes les données climatologiques disponibles à l'ACMG depuis les années 1950 pour analyser l'évolution des températures moyennes annuelles sous abri. Nous avons choisi la station AGEN, qui possède la plus longue série et qui est représentative des conditions en Moyenne-Garonne, dans les vallées de la Garonne et du Lot, entre Montauban et La Réole. Les stations de coteaux sont moins froides.

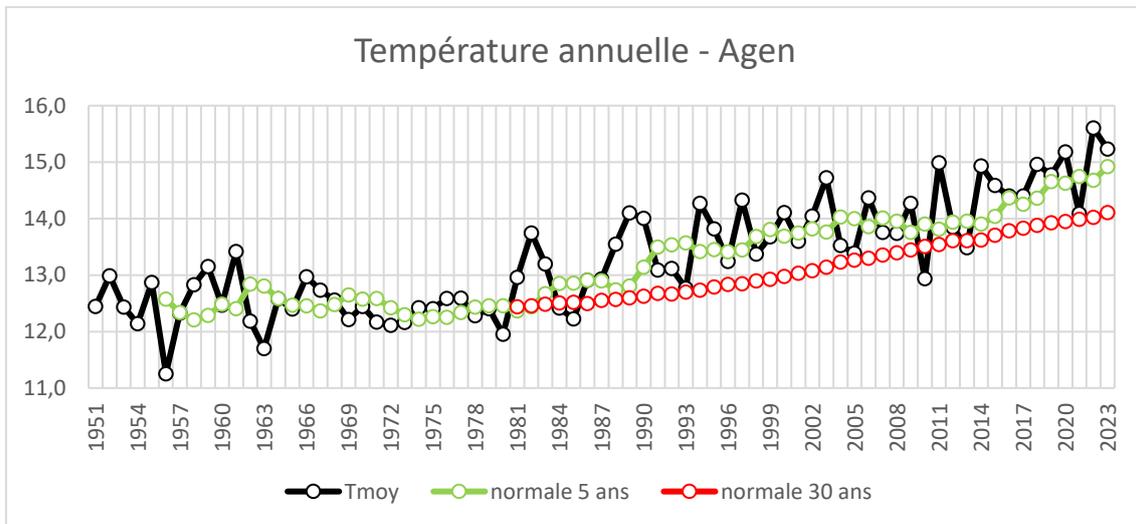


Figure 15 : Evolution historique de la température moyenne annuelle à Agen et sous abri (en noir), de la moyenne quinquennale (en vert) et de la normale sur 30 ans (en rouge).

Le premier graphique (Figure 15) montre l'évolution de cette température moyenne annuelle sous abri, mesurée près d'Agen depuis 1951 par Météo-France puis par l'ACMG près de l'aéroport d'Agen, dans une zone herbeuse, et depuis 2022 à la Technopole Agen Garonne, toujours sur la rive gauche de la Garonne, également dans une zone herbeuse et relativement boisée, sans l'influence des pistes de l'aéroport ni des routes de la zone.

L'année la plus froide a été 1956, avec une vague de froid hivernale dramatique, avec des températures en février souvent inférieures à -20°C , qui a tué les espèces méditerranéennes de la région (oliviers, lauriers, figuiers, etc.).

À partir des années 1980, les températures moyennes ont commencé à augmenter, dépassant le seuil de 14°C en 1989 et 1990. Depuis lors, les températures ont continué à augmenter, malgré quelques baisses de courte durée, comme en 2010 et 2013. Le maximum observé jusqu'à présent en 2022, soit $15,6^{\circ}\text{C}$, correspond à une augmentation normale de la température de $1,8^{\circ}\text{C}$ au cours des trois dernières décennies. Si l'on considère l'augmentation par décennie, on constate qu'au cours des 30 dernières années, il y a eu une augmentation successive tous les dix ans de $+0,5$, $+0,4$ et $+0,9^{\circ}\text{C}$.

Notre objectif est d'imaginer les conditions climatiques et donc thermiques dans lesquelles nous vivrons dans les trente prochaines années. Nous proposons deux scénarios : le premier est assez

optimiste et se base sur une poursuite de la pente moyenne observée depuis 30 ans, soit une augmentation de 1,8°C d'ici 2053, et le second est plus réaliste et se base sur une extrapolation de ce qui vient de se passer ces dernières années, soit une augmentation de 2,7°C supplémentaires d'ici 2053.

Ne disposant pas d'un modèle capable de construire ces températures, nous supposons que les phénomènes climatiques de dépressions passagères et d'anticyclones observés ces trente dernières années continueront à se produire, avec un seul changement majeur qui sera l'augmentation de la température. Nous avons donc pris la variation observée, l'avons doublée et l'avons projetée en fonction de l'augmentation de la température de 1,8°C puis de 2,7°C. Avec ces nouvelles séries de données journalières, nous avons tracé le climat futur de notre secteur.

Nous avons appliqué cette méthode en 2013 et depuis, nous avons constaté qu'elle a permis d'anticiper les phénomènes extrêmes que nous avons connus en termes de canicule. Nous n'avons pas travaillé sur le gel, mais nous avons prévu un démarrage plus précoce des cycles végétatifs, sans imaginer les conséquences que l'on verra malheureusement en 2021 et 2022.

B.3.1.2. Résultats

La Figure 16 montre l'évolution passée et future de la température moyenne annuelle à Agen sous abri (en noir), la moyenne quinquennale en vert et la normale en rouge, en tenant compte d'une progression modérée équivalente à celle observée sur 30 ans de 1,8 °C.

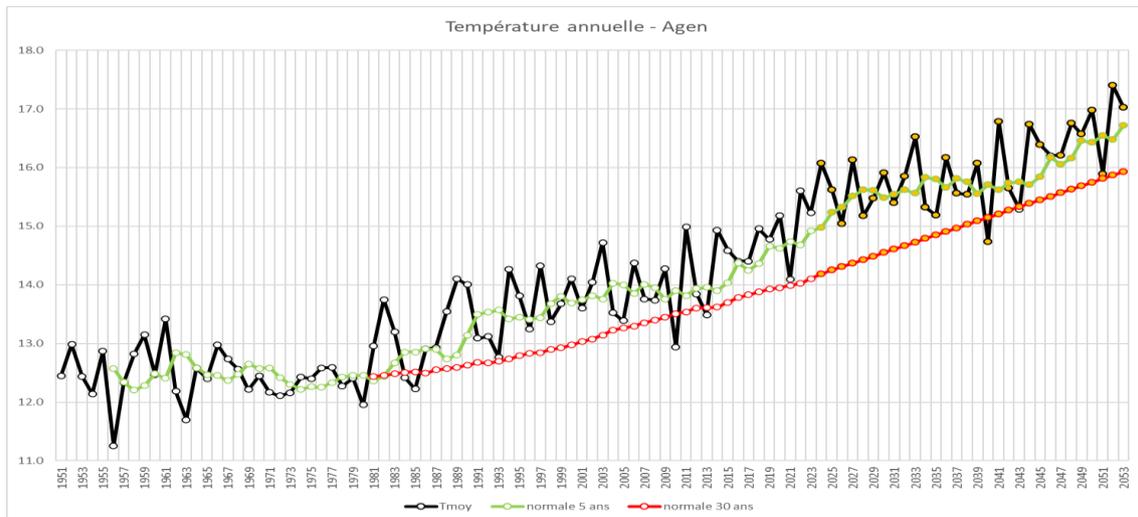


Figure 16 : Tendances passées et futures avec une augmentation de 1,8°C au cours des 30 prochaines années de la température moyenne annuelle à Agen et sous abri (en noir), de la moyenne sur cinq ans (en vert) et de la normale (en rouge). Les points et la ligne jaunes sont les données prédites.

On constate qu'en seulement 70 ans, la température moyenne à Agen pourrait s'élever à près de 5°C si nous ne réduisons pas la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, principalement le

CO2. Dans le scénario le plus réaliste d'un progrès conforme à ce que nous connaissons depuis dix ans, cette augmentation sera de près de 6°C !¹

A partir de cet ensemble de données sur les températures maximales et minimales de la région d'Agen observées entre 1951 et 2023, ainsi que celles produites jusqu'en 2053 selon la méthode brièvement décrite ci-dessus, nous avons analysé les données relatives aux gelées de printemps. Il s'agit tout d'abord de relever le nombre de jours où les températures sont descendues en dessous de 0°C sous abri, sachant que cela correspond à -2°C à 1,50 m à l'air libre, ce qui est préjudiciable aux plantes sensibles qui ont commencé à pousser.

La Figure 17 montre l'évolution depuis 1951 du nombre de jours avec des températures minimales inférieures à 0°C à Agen jusqu'en 2023 pour la partie observée et de 2024 à 2053 pour la partie projetée, avec une augmentation de seulement 1,8°C.

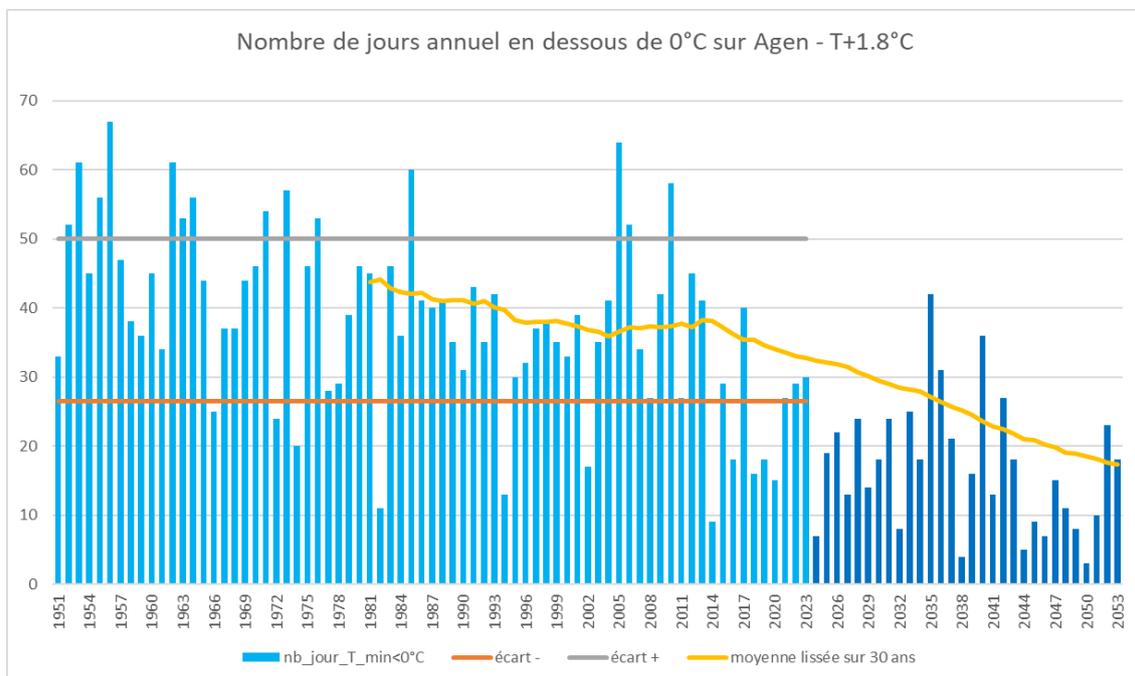


Figure 17 : Évolution passée et future du nombre de jours annuels avec des températures négatives à Agen et sous abri, où le jaune est la normale et le gris et le marron sont les écarts types.

Il convient de noter que ce graphique comprend des données pour tous les jours de l'année, y compris l'automne, l'hiver et le printemps, et pas seulement pour les mois à risque de gel, de mars à mai, comme indiqué ci-dessous.

Cela confirme qu'il sera difficile de couvrir les besoins en froid des cultures, comme ce fut le cas en 2014, où des périodes de floraison très longues ont été observées chez les pommiers Golden

¹ Dans un autre document, nous avons effectué la même analyse climatique sur les précipitations, où nous montrons que les totaux de précipitations resteront stables, voire augmenteront, car l'atmosphère plus chaude pourra retenir davantage de vapeur d'eau provenant de l'océan ou de la Méditerranée. Cependant, avec des températures plus élevées, les besoins en eau seront plus importants.

et certains pruniers. Dans le futur, cette situation pourrait se produire beaucoup plus régulièrement, comme en 2032, 2038, 2044, 2045, 2046, 2049 et 2050. A la fin de ce demi-siècle, nous aurons perdu une quinzaine de jours de gel entre octobre et avril.

A partir des relevés des températures minimales observées en avril depuis 1951 à Agen, nous avons tracé le graphique des températures minimales observées en avril depuis 1951 à Agen. La Figure 18 montre la valeur extrême de ce minimum du mois d'avril. Il est facile d'imaginer que lorsque la température minimale est inférieure à -2°C sous abri, des dégâts très importants dus au gel se produisent dans la région comme ce fut le cas en 1991, 1997, 2021 et 2022.

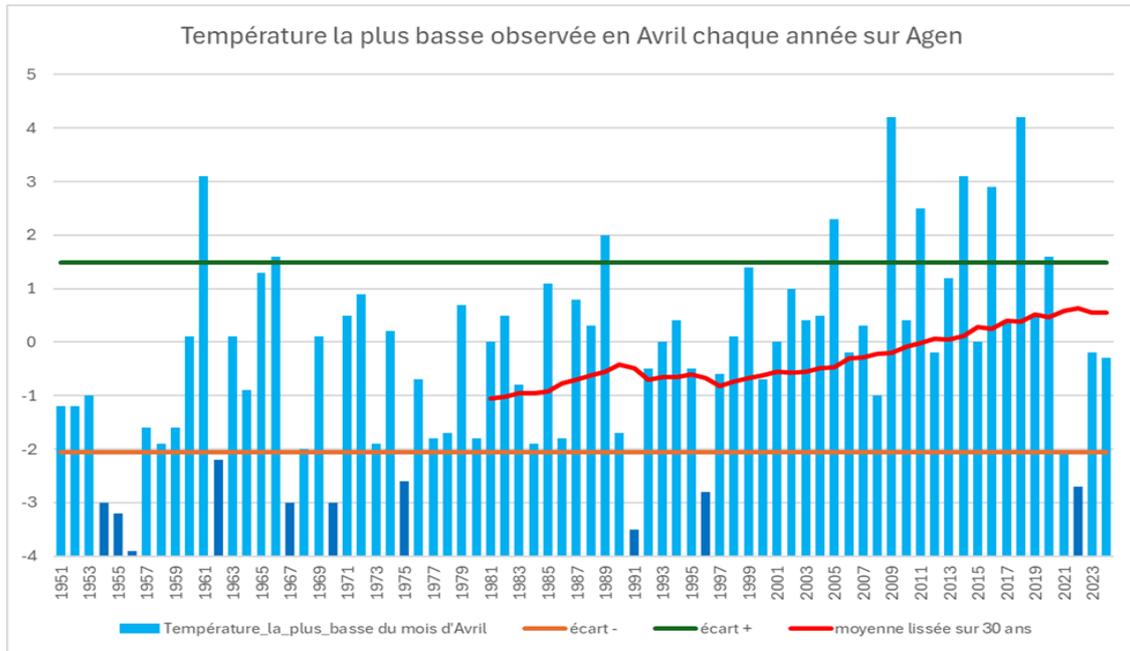


Figure 18 : Évolution de la température minimale sous abri pour le mois d'avril à Agen, de 1951 à 2024.

Les années les plus froides et les plus touchées par le gel, telles que 1956, 1967, 1970, 1991 et 2021 et 2022, sont clairement visibles. Cependant, la tendance sur la moyenne de 30 ans est clairement à la hausse, les températures passant de -1°C au début des années 1980 à $+0,5^{\circ}\text{C}$ en 2020. Entre 1997 et 2020, les températures minimales du mois d'avril ne sont jamais descendues en dessous de -1°C , et seules les cultures telles que les kiwis, les abricots, les pêches et les variétés précoces doivent être protégées du gel. Cependant, en 2021 et 2022, nous connaissons deux vagues de froid qui rappelleront celles des années 1960 et 1970, ce qui doit nous alarmer et nous obliger à être encore plus vigilants face à ces intempéries, avec des moyens de lutte efficaces.

Examinons la période de gel printanier dans l'Union européenne. Figure 19 qui présente les données pour les mois de mars, avril et mai uniquement, et pour le scénario de $+1,8^{\circ}\text{C}$ sur 30 ans.

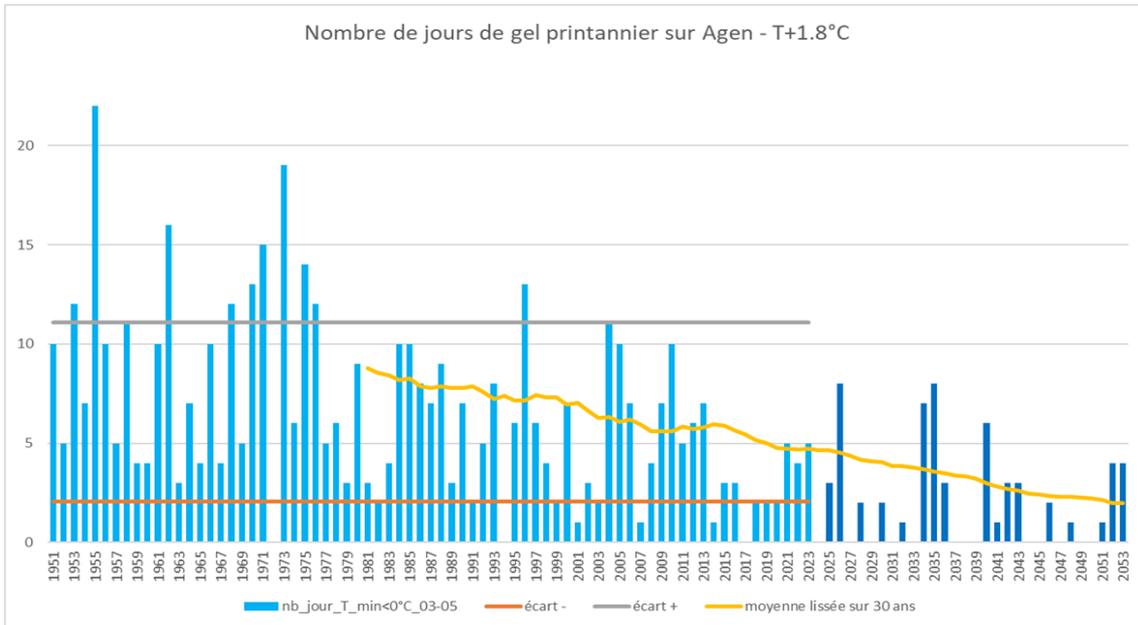


Figure 19 : Évolution passée et future du nombre de jours avec des températures négatives à Agen et sous abri entre mars et mai, où le jaune est la normale et le gris et le marron sont les écarts types.

En observant simplement l'évolution du nombre de jours de gel dans les mois de mars à mai depuis 1951 et en la projetant jusqu'en 2053 selon la méthode proposée ci-dessus, on peut confirmer une diminution du nombre de jours à risque, avec une alternance de plus en plus fréquente d'une absence totale de gel avec quelques nuits de gel, même en avril. Cela signifie d'ores et déjà que la lutte contre le gel, moins utilisée, continuera à l'être régulièrement, ce qui nous incite à maintenir une protection active. De plus, nous constatons que la diminution du nombre de jours froids, surtout en mars, permet à la végétation d'être active plus tôt, alors que des périodes de froid dangereuses sont encore possibles en avril. C'est ce type de scénario qui se produit assez régulièrement depuis 2017 dans le sud-ouest de la France, comme dans le sud-est depuis 2004.

Par conséquent, nous avons anticipé et examiné les tendances passées et prévues des températures moyennes du couvert végétal de février à mars, qui influencent l'accélération du démarrage de la végétation une fois que le besoin de froid des plantes a été satisfait.

La Figure 20 montre l'évolution des températures pour les mois de février et mars mesurées sous abri à Agen.

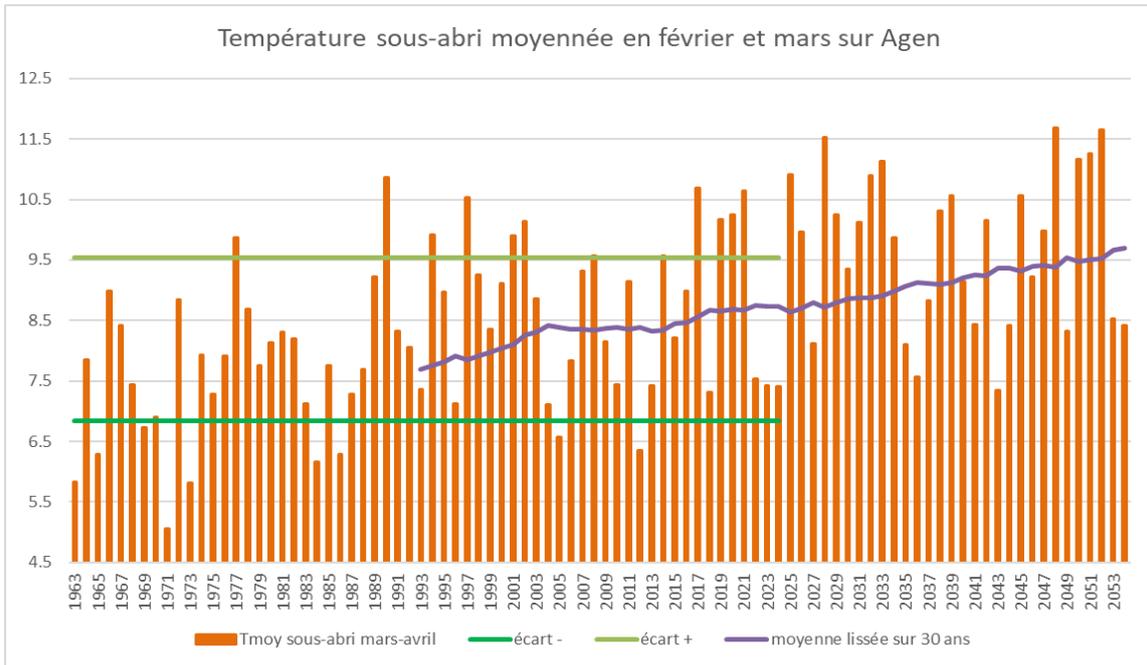


Figure 20 : Evolution passée et future de la température moyenne sous abri à Agen pour les mois de février et mars.

La variabilité est importante, certaines années enregistrant moins de 6,5°C et d'autres plus de 9,5°C. La température normale en 1993 était de 7,6°C, elle est passée à près de 8,5°C en 2003 et a dépassé ce seuil en 2017. Selon la projection de +1,8°C, cette moyenne atteindrait 9,5°C avant les années 2050, conditions qui ont effectivement déclenché l'avancée de 2021 et le gel qui s'en est suivi au début du mois d'avril.

La même analyse a été répétée en supposant que le réchauffement se poursuive au rythme actuel de 0,9°C tous les dix ans, soit 2,7°C supplémentaires d'ici 2053. La Figure 21 montre les tendances passées et futures avec cette augmentation de 2,7°C de la température moyenne annuelle à Agen mesurée sous abri.

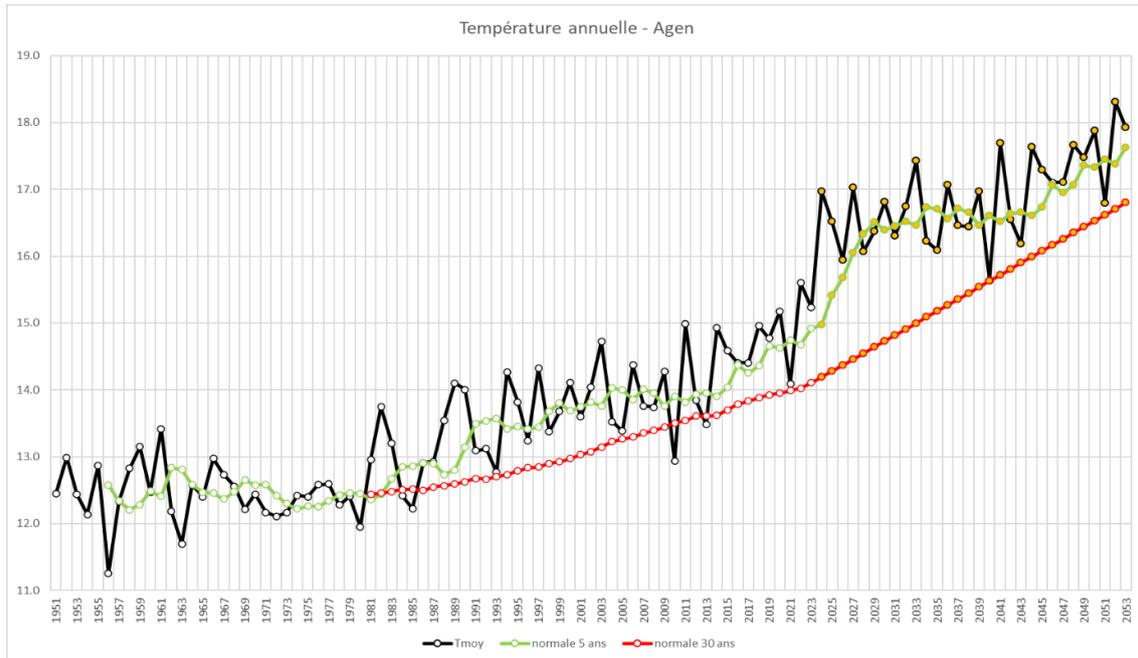


Figure 21 : Evolution passée et future, avec une augmentation de 2,7°C au cours des 30 prochaines années, de la température moyenne annuelle à Agen mesurée sous abri (noir), de la moyenne quinquennale (vert) et de la normale en rouge.

L'évolution semble irréaliste, mais elle traduit ce que nous risquons de vivre entre 2024 et 2053, soit une augmentation de 0,9°C tous les dix ans, comme c'est le cas depuis une dizaine d'années. Dans ces conditions, l'écart entre ce que nous avons connu et ce que nous connaissons est de près de 6°C, ce qui augmentera les besoins en eau et accélérera la précocité de la végétation.

Ainsi, le nombre de jours de gel entre mars et mai devrait diminuer significativement sans pour autant disparaître complètement. On imagine que les cultures adaptées auront moins besoin de froid, ce qui leur permettra de commencer à pousser plus tôt, en février et début mars, les rendant plus vulnérables aux vagues de froid durant ces périodes, alors qu'aujourd'hui ces plantes sont encore en dormance durant cette période et peuvent supporter des températures même inférieures à -10°C.

En conclusion, nous imaginons que l'eau sera le facteur d'adaptation nécessaire car elle ne devrait pas être limitée au printemps. Par ailleurs, les solutions de lutte active ou passive à base d'eau nous semblent devoir être recommandées en raison notamment de leur efficacité et de leur facilité de mise en œuvre dans un contexte de coût élevé de la main d'œuvre et de l'énergie. Les investissements réalisés dans les années à venir pour assurer cette protection hydrique serviront sans doute à soutenir les cultures en période estivale, où les vagues de chaleur seront plus fréquentes et où, là encore, l'eau sera un moyen d'adaptation durable. L'évidence de ce risque futur de vagues de chaleur est confirmée par ce dernier graphique (Figure 22), qui montre l'évolution du nombre de jours avec des températures maximales supérieures à 35°C (mesurées sous abri) à Agen et la projection future jusqu'en 2053.

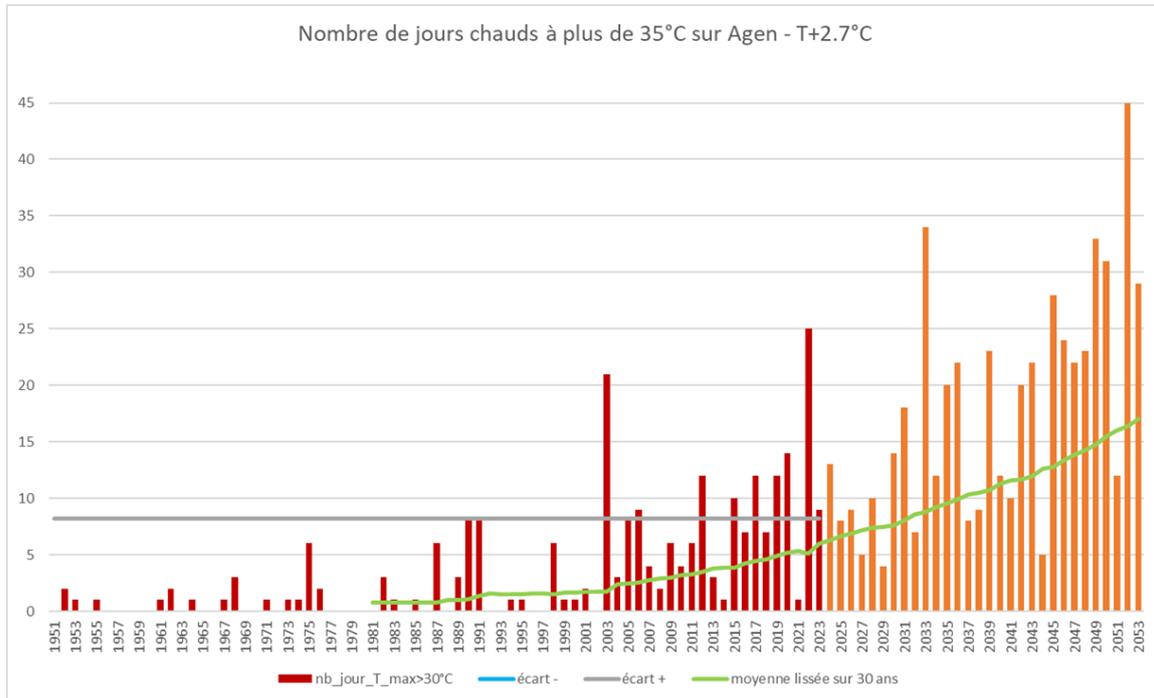


Figure 22 : Evolution passée et future, avec une augmentation de 2,7°C au cours des 30 prochaines années, du nombre de jours à Agen avec plus de 35°C (mesuré sous abri).

L'été 2003, qui reste l'un des plus meurtriers en France à cause de la canicule, a déjà été dépassé par l'été sec de 2022. Le seuil de 20 jours de canicule par an devrait être atteint régulièrement à partir de 2035 et largement dépassé vers 2050. ³³Les besoins en eau des cultures seront alors multipliés par au moins 0,5, faisant passer les besoins en irrigation des pommiers de 2500 m³/ha actuellement à près de 4000 m³/ha en 2050.

B.3.2. Dordogne. Climatologie et projections de gel et de température

L'évolution des températures et des jours de gel en Dordogne au cours des 30 dernières années reflète le changement climatique mondial et régional. La Dordogne, située dans le sud-ouest de la France, connaît d'importantes variations climatiques qui ont un impact significatif sur l'environnement, l'agriculture et les moyens de subsistance locaux.

Tendances des températures

Au cours des trois dernières décennies, les températures moyennes en Dordogne ont connu une tendance à la hausse. Cette augmentation des températures moyennes annuelles est cohérente avec le réchauffement climatique observé au niveau mondial. Les étés deviennent plus chauds, avec des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses. Les hivers, en revanche, ont tendance à être plus doux, ce qui réduit le nombre de jours de gel.

Jours de gel

Les jours de gel, définis comme les jours où la température minimale descend en dessous de 0 °C, diminuent. Cette diminution est une conséquence directe de l'augmentation des températures hivernales. La diminution du nombre de jours de gel peut avoir différents effets sur la région. Par exemple, elle peut prolonger la période de croissance de certaines cultures, mais

elle peut aussi augmenter la vulnérabilité des plantes aux ravageurs et aux maladies qui ne sont plus limités par les basses températures.

Comparaison avec les valeurs climatiques normales

Pour évaluer l'ampleur de ces changements, il est essentiel de comparer les données actuelles avec les normales climatiques des 30 dernières années. Les normales climatiques sont des moyennes calculées sur une période de 30 ans, qui atténuent les variations annuelles et constituent une référence stable pour mesurer les anomalies climatiques.

Implications

L'augmentation des températures et la diminution du nombre de jours de gel ont un impact majeur sur divers aspects de la vie en Dordogne :

- Agriculture : les changements de température peuvent affecter les cycles de croissance des cultures, la répartition des espèces agricoles et la gestion de l'eau.
- Biodiversité : le changement climatique peut entraîner le déplacement d'espèces et modifier les écosystèmes locaux.
- Santé : la hausse des températures peut accroître les risques pour la santé, en particulier lorsque les vagues de chaleur deviennent plus fréquentes.

En conclusion, l'évolution des températures et des jours de gel en Dordogne sont des indicateurs clés de l'impact du changement climatique dans la région. Il est essentiel de comprendre ces tendances pour s'adapter et atténuer les effets négatifs potentiels sur l'environnement et la société.

Prévisions de température pour la Dordogne

Les projections climatiques pour la Dordogne, comme pour de nombreuses autres régions du monde, indiquent une tendance continue à l'augmentation des températures dans les décennies à venir. Ces projections sont basées sur différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre élaborés par des organismes tels que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Hausse des températures moyennes

Les modèles climatiques suggèrent que les températures moyennes annuelles en Dordogne pourraient augmenter de 2°C à 4°C d'ici la fin du siècle, en fonction du scénario d'émissions (Figure 23). Les étés seront particulièrement touchés par cette augmentation, et les températures maximales estivales sont susceptibles d'augmenter encore. Les vagues de chaleur deviendront plus fréquentes et plus intenses, prolongeant les périodes de chaleur extrême et augmentant les risques pour la santé publique et l'agriculture.

De même, les températures minimales augmenteraient de 0,95°C en 2050 et de 2,94°C en 2100 par rapport à la médiane de la période 1985-2020 (Figure 24).

Température moyenne annuelle (°C)

RCP 8.5

Moyenne des températures entre le 1 janvier et le 31 décembre

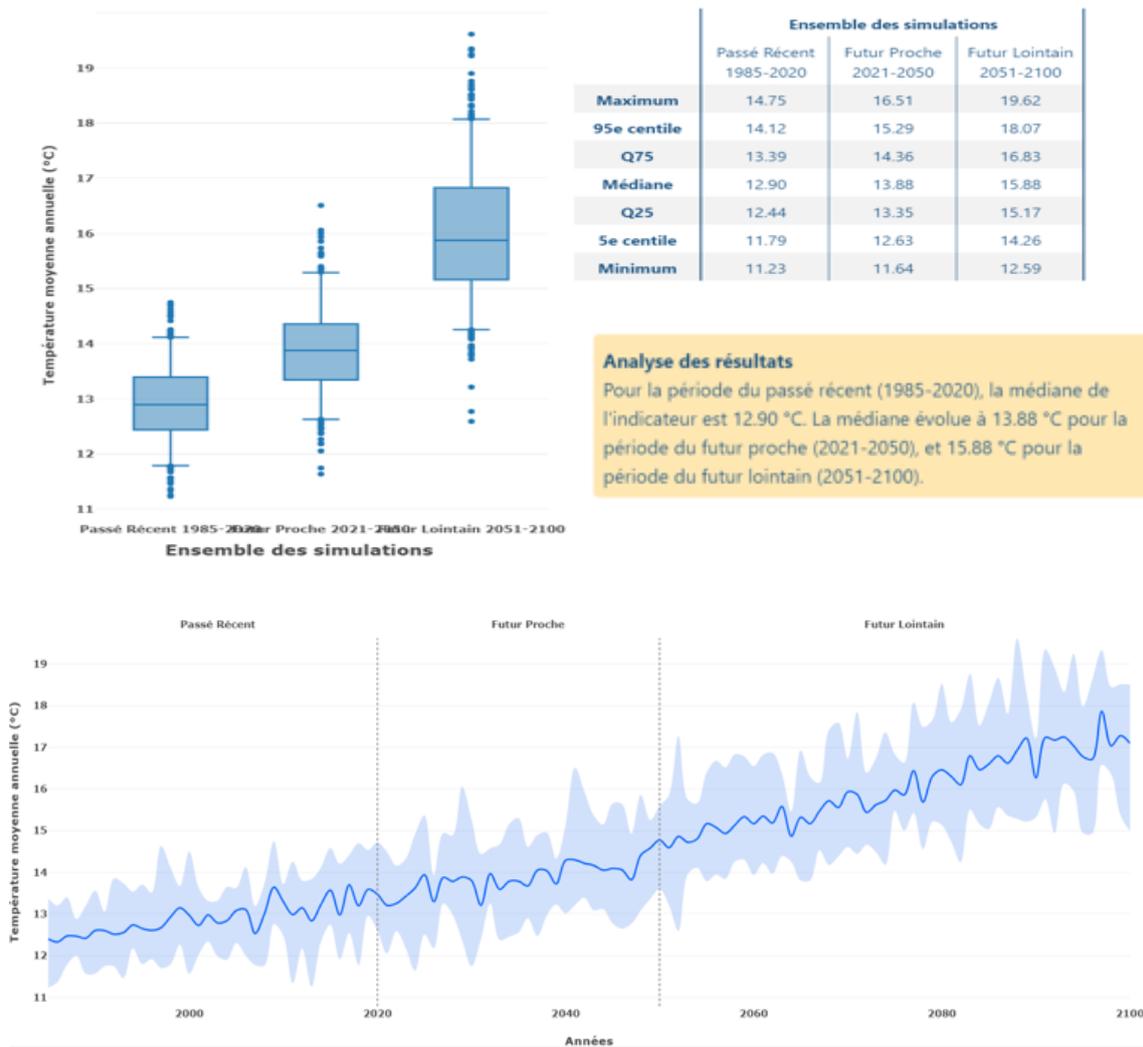


Figure 23 : Évolution de la température annuelle moyenne depuis 1985 et prévisions à court et à long terme dans le cadre du scénario de changement climatique RCP8.5.

Température minimale annuelle (°C)

RCP 8.5

Moyenne des températures minimales entre le 1 janvier et le 31 décembre

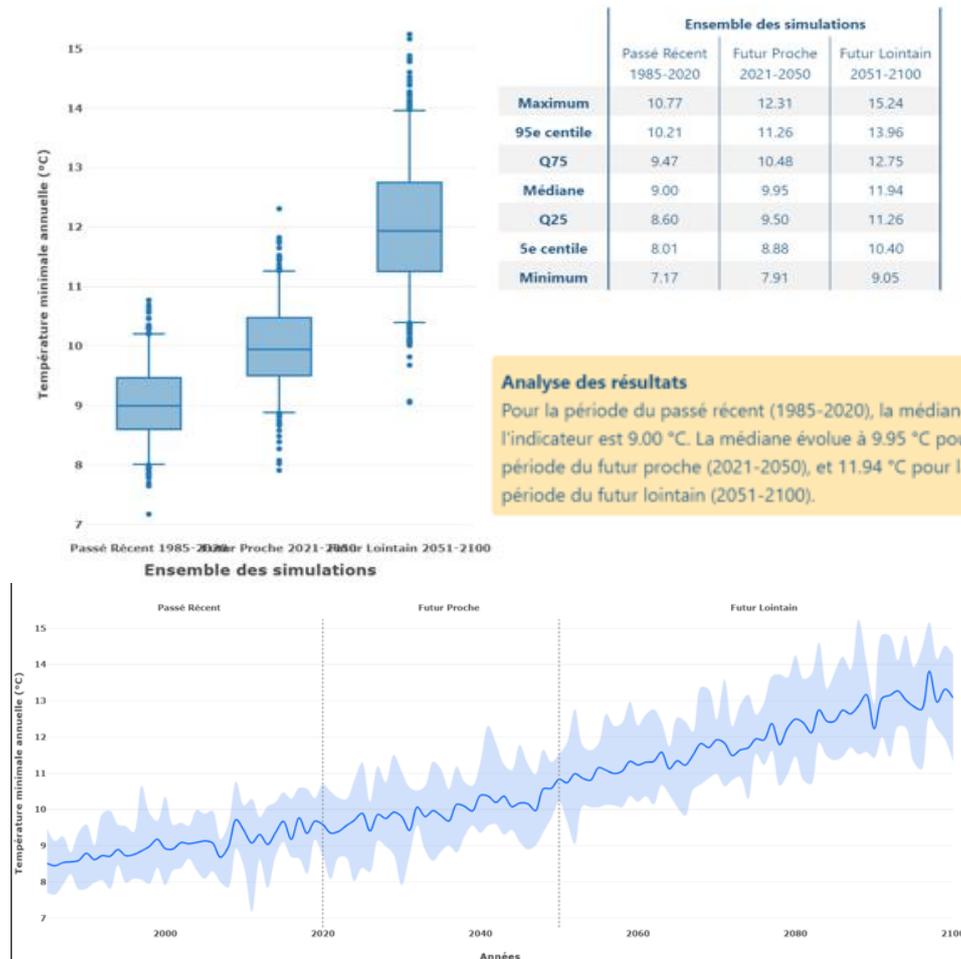


Figure 24 : Évolution de la température minimale annuelle (moyenne des températures minimales quotidiennes) depuis 1985 et prévisions à court et à long terme dans le cadre du scénario de changement climatique RCP8.5.

Réduction du nombre de jours de gel

Dans le même temps, le nombre de jours de gel en Dordogne devrait continuer à diminuer (Figure 25) selon les projections climatiques :

- D'ici 2050, le nombre de jours de gel pourrait être réduit de 30 à 50 % par rapport aux niveaux actuels.
- D'ici 2100, les jours de gel pourraient devenir rares, en particulier dans les scénarios où les émissions de gaz à effet de serre sont élevées. Il est possible que certaines années, il n'y ait que quelques jours de gel, voire aucun, dans certaines régions de la Dordogne.

Nombre de jours de gel RCP 8.5 Dénombrement des jours durant lesquels la température minimale est en dessous de 0 °C entre le 1 mars et le 31 mai

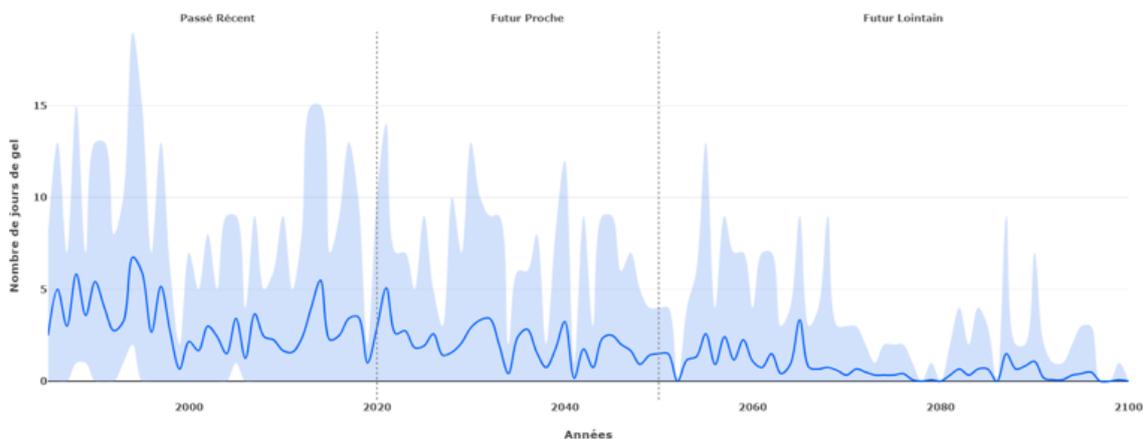
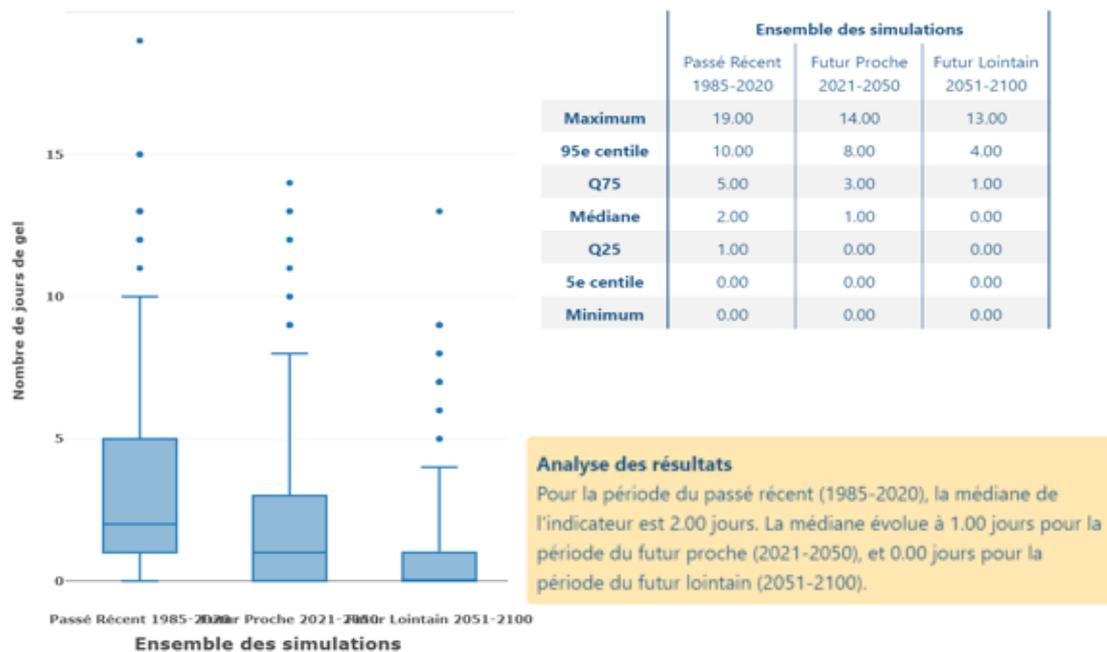


Figure 25 : Évolution du nombre de jours de gel (température minimale inférieure à 0°C) entre mars et mai depuis 1985 et prévisions à court et à long terme selon le scénario de changement climatique RCP8.5.

Date de la dernière gelée

De même, la date du dernier gel serait avancée de 10 jours en 2050 et de près d'un mois en 2100 par rapport à la période 1985-2020 (Figure 26).

Dernier jour de gel RCP 8.5

Dernier jour où la température minimale est en dessous de 0 °C entre le 1 janvier et le 31 mai

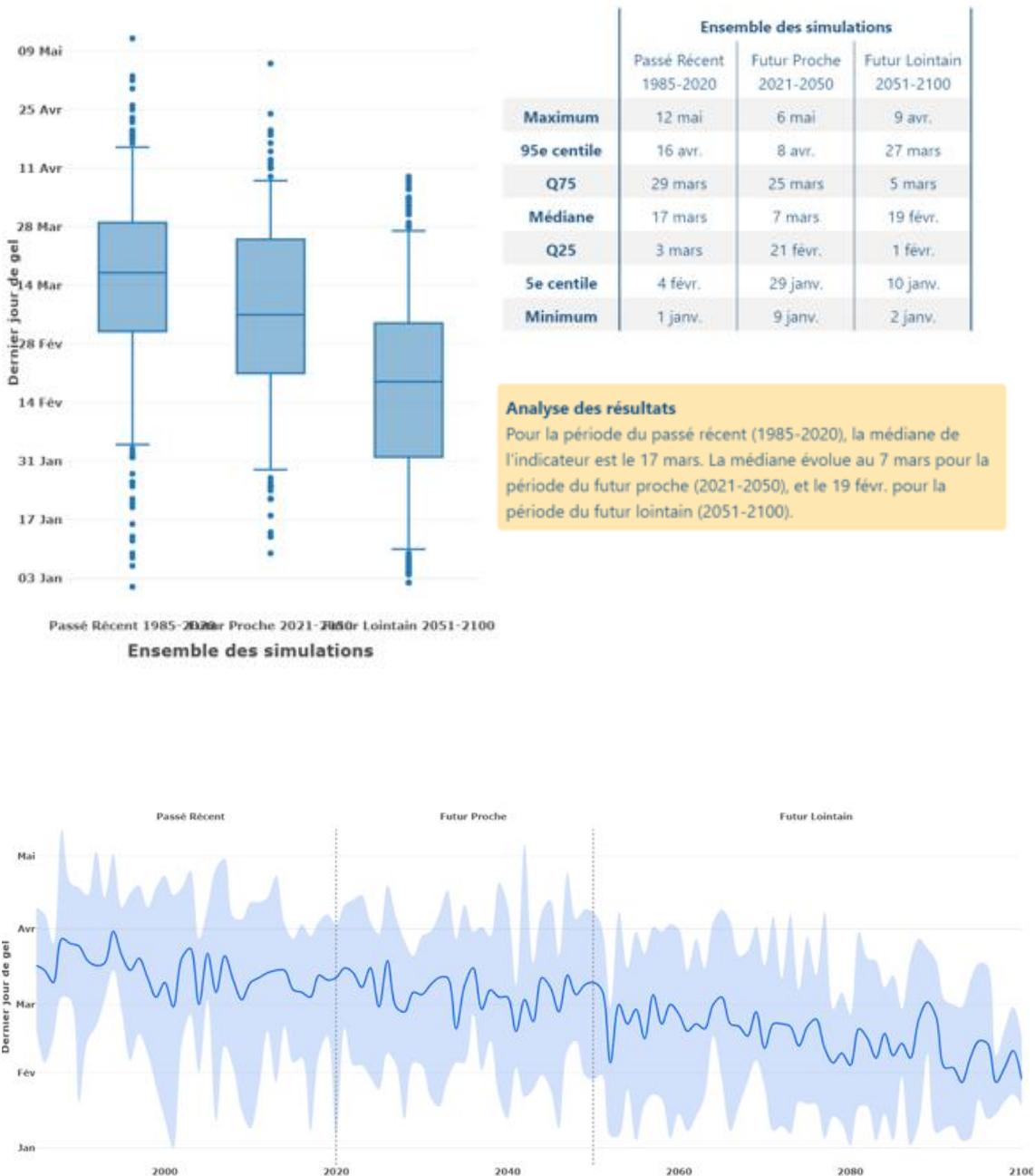


Figure 26 : Évolution du dernier épisode de gel (température minimale inférieure à 0°C) entre janvier et mai depuis 1985 et prévisions à court et à long terme dans le cadre du scénario de changement climatique RCP8.5.

B.3.3. Châtaigniers. Effets de la climatologie

Depuis plusieurs années, les dates des principales étapes du développement du châtaignier (bourgeonnement, floraison, maturation des fruits) sont avancées de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines. Depuis près de 10 ans, les variétés Bétizac et Marigoule poussent avec une dizaine de jours d'avance (Mouravy, 2021).

Les châtaigniers sont exposés au risque de gel printanier de début mars à mi-mai. Les stades phénologiques potentiellement sensibles au gel à cette période sont les stades B (code BBCH 07), C (code BBCH 09) et D (code BBCH 11), dont les seuils de sensibilité sont respectivement de -8°C , -3°C et -2°C (Osaer et al, 1998). Les gelées de printemps peuvent donc endommager les bourgeons apicaux des rameaux et les bourgeons à fruits. Ce risque est d'autant plus important dans le contexte du changement climatique qui affecte la précocité des châtaigniers, notamment sur les sites ensoleillés et exposés au sud-ouest (Lheureux, 2023).

Les effets sur la production dépendent des variétés. Une gelée de printemps peut conduire à l'annulation de la production de la variété Marigoule ou à une réduction partielle de la production des variétés Bouche de Bétizac ou Bellefer. En revanche, certaines variétés de *Castanea sativa* germent tardivement, ce qui limite les risques de gelées printanières (L'heureux, 2023). Par ailleurs, le porte-greffe peut avoir ou non un effet de sensibilité sur la variété. Marsol (CA 07) n'induit pas de sensibilité au gel, alors que Marlhac (CA 118) et Marigoule induisent une sensibilité variétale (Fauriel, 2021).

Les travaux de Schaberg et al (2022) méritent également d'être mentionnés. Ils ont étudié la différence de sensibilité au gel de divers cultivars de châtaignier américain (*Castanea dentata*) et ont montré qu'il existe une différence génétique. Les châtaigniers des régions chaudes sont plus productifs, mais plus sensibles aux gelées printanières que les châtaigniers des régions plus froides. Cela pourrait signifier que la protection contre le froid peut être préjudiciable à un potentiel de croissance plus élevé. Toutefois, les auteurs soulignent que, malgré l'influence négative du gel sur la croissance, la productivité globale des arbres était exceptionnelle, même à la limite septentrionale de l'aire de répartition de l'espèce, à condition que la disponibilité en eau dans le sol soit adéquate.

Enfin, il convient de noter que certains auteurs (Jones et al., 1980) ont montré une corrélation positive entre les dégâts causés par le gel et les dégâts causés par la maladie de l'encre (*Endothia parasitica*).

En Espagne, des travaux ont été menés (Diaz et al., 2022) pour mesurer la résistance des populations de châtaignier sauvage (*Castanea sativa*) aux gelées printanières et hivernales. Les différences entre populations en termes de dégâts de gel étaient très importantes, avec un résultat similaire à celui des Américains : les moyennes des populations étaient étroitement corrélées aux conditions de gel auxquelles les parents étaient soumis, révélant une forme d'adaptation génétique à ce phénomène.

B.4. Portugal

B.4.1. Nord-est du Portugal. Climatologie et projection des gelées et des températures

B.4.1.1. Introduction

L'apparition de gelées dans le nord-est du Portugal au printemps, lorsque la plupart des cultures sont à un stade de développement très sensible aux basses températures, cause souvent des dommages importants à l'agriculture. En automne, les gelées précoces, lorsqu'elles surviennent avant la récolte, causent également des dommages. Les revenus des agriculteurs sont gravement affectés et l'absence de stabilisation de la production a également des conséquences pour les entreprises et les coopératives du secteur. Dans la région de Trás-os-Montes, située au nord-est du Portugal, le gel est l'une des principales causes de la réduction des rendements de cultures importantes telles que les pommiers, les cerisiers, les amandiers et les vignes. En plus de réduire la production, le gel provoque des déformations et d'autres défauts dans les fruits, réduisant ainsi leur valeur commerciale.

B.4.1.2. Gel

Le climat du nord-est du Portugal est caractérisé par la migration de l'anticyclone des Açores vers le nord en été et vers le sud en hiver. Cette région est fréquemment traversée, surtout en hiver, par des dépressions qui provoquent d'importantes fluctuations de la température de l'air et des précipitations et dont l'effet est parfois renforcé par la trajectoire de masses d'air d'origines très différentes. Sous l'influence de ces conditions, une grande variété de circulations à méso-échelle prend naissance, qui, à son tour, contribue à un modèle diversifié de variabilité de la température de l'air.

L'apparition du gel dans une région est fortement déterminée par la situation synoptique existante. Par conséquent, l'analyse des situations synoptiques dans lesquelles le gel se produit dans une région donnée est d'une importance fondamentale pour l'étude de la climatologie du gel. La Figure 27 montre la fréquence relative d'apparition des différentes masses d'air dans la région de Trás-os-Montes pendant la période printanière.

La situation synoptique qui détermine l'invasion de la masse d'air froid polaire continentale (Pck) dans le nord-est du Portugal est caractérisée par un anticyclone situé au centre ou au nord de l'Europe, ou par l'anticyclone des Açores lorsqu'il culmine au nord et par l'action conjointe d'un thalweg établi dans le bassin méditerranéen. L'advection de cette masse d'air est généralement accompagnée de vents modérés à forts et très secs. C'est son action déshydratante combinée aux basses températures qui donne lieu aux gelées d'advection au printemps. La Figure 27 montre que la masse d'air froid polaire continentale (Pck), bien que rare, se produit entre février et mai.

La masse d'air froid polaire maritime (Pmk) est produite lorsqu'elle est transportée par l'action conjointe de l'anticyclone des Açores, qui culmine au nord, et de la dépression située dans la zone des îles britanniques. Cette masse d'air envahit la région assez fréquemment en avril et mai et est responsable de l'apparition de gelées tardives (Gonçalves, 1985a). La masse d'air polaire maritime froide (Pmk) se produit tous les mois et est la deuxième plus fréquente après la masse d'air polaire maritime chaude (Pmw).

Les gelées d'advection dans la région de Trás-os-Montes se produisent principalement sous l'influence de masses d'air polaire continental froid et polaire maritime froid, et peuvent occasionnellement se produire sous l'influence d'une masse d'air polaire continental chaud (Gonçalves, 1985).

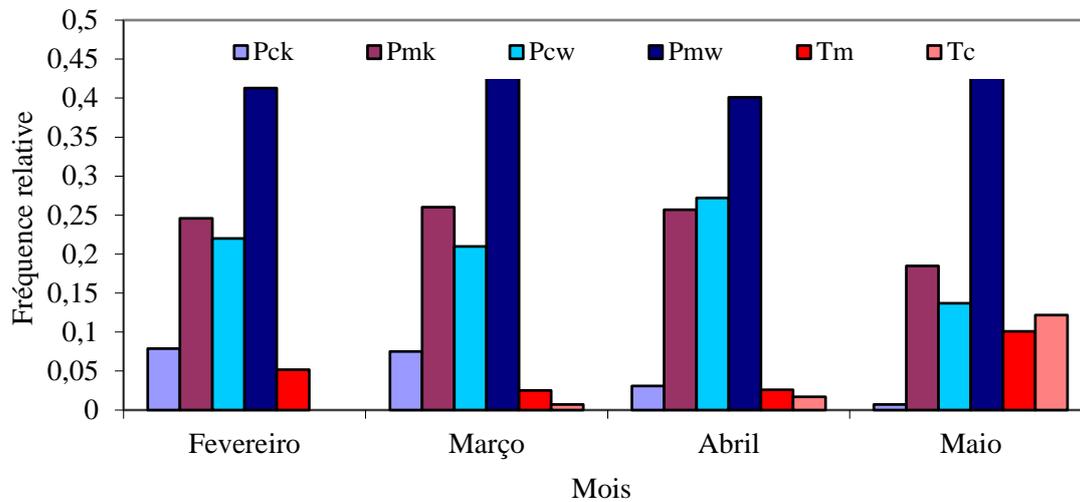


Figure 27 : Fréquence d'occurrence des masses d'air polaire continental froid (Pck), polaire maritime froid (Pmk), polaire continental chaud (Pcw), polaire maritime chaud (Pmw), maritime tropical (Tm) et continental tropical (Tc) à Bragança.

La masse d'air polaire continentale chaude est généralement le résultat de la transformation de l'air polaire continental froid, lorsque l'anticyclone au-dessus de l'Europe centrale culmine au-dessus de l'Afrique du Nord, transportant de l'air polaire profondément modifié, mais toujours avec les caractéristiques de l'air polaire. Cette masse d'air est responsable de températures maximales relativement élevées pendant les mois d'hiver, bien que les températures minimales puissent descendre en dessous de 0°C en février et mars et s'approcher de 0°C en avril. Cette masse d'air peut également être responsable de l'apparition de gelées tardives dans des situations topographiques favorables.

B.4.1.3. Températures

La Figure 28 montre l'évolution de la température moyenne annuelle à Bragança au cours des 72 dernières années (1950-2022). Une tendance à la hausse de la température peut être observée depuis les années 1970. Si l'on considère la moyenne mobile sur 5 ans, on constate que cette augmentation est de l'ordre de 2°C.

Gonçalves et al. (2019) ont analysé les séries de températures moyennes, maximales et minimales à Bragança et ont constaté une tendance à la hausse, en particulier au cours du trimestre de printemps, avec des valeurs de 0,6 °C/décennie et 0,8 °C/décennie, respectivement pour la température moyenne et la température maximale. Dans l'analyse mensuelle, les mois de mars, avril, mai et juin se distinguent, tous avec des tendances à la hausse des températures moyennes et maximales de plus d'un demi-degré Celsius par décennie. Parmi eux, les mois de mai et juin sont ceux qui présentent la tendance à la hausse la plus significative, égale ou supérieure à 0,7 °C/décennie. Cette tendance atteint des valeurs maximales de 1,0°C et 0,9°C/décennie pour la température maximale en mai et juin respectivement. La tendance à la hausse de la température moyenne mensuelle semble être due à l'augmentation des températures maximales, car les tendances des températures minimales pour les mêmes mois sont toujours inférieures à 0,4 °C/décennie.

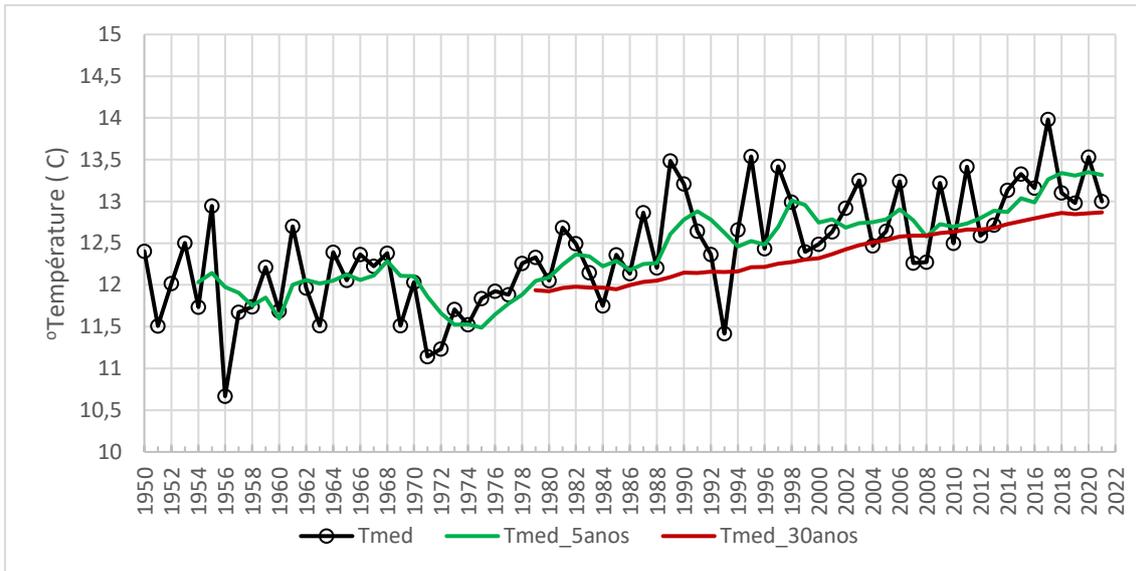


Figure 28 : Évolution de la température moyenne annuelle à la station météorologique de Bragança (Portugal) au cours de la période 1950-2022. Les lignes rouge et verte représentent respectivement les moyennes mobiles sur 30 ans et sur 5 ans.

L'évolution de la température moyenne sur la période février-mars (1950-2022) montre une tendance à la hausse (Figure 29). Gonçalves et al. (2019) ont conclu que cette tendance au cours de la période 1973-2012 est principalement due à l'augmentation de la température maximale au cours de ces mois (0,5 et 0,7°C/décennie en février et mars respectivement) et moins à l'augmentation de la température minimale (-0,3°C et 0,2°C/décennie respectivement).

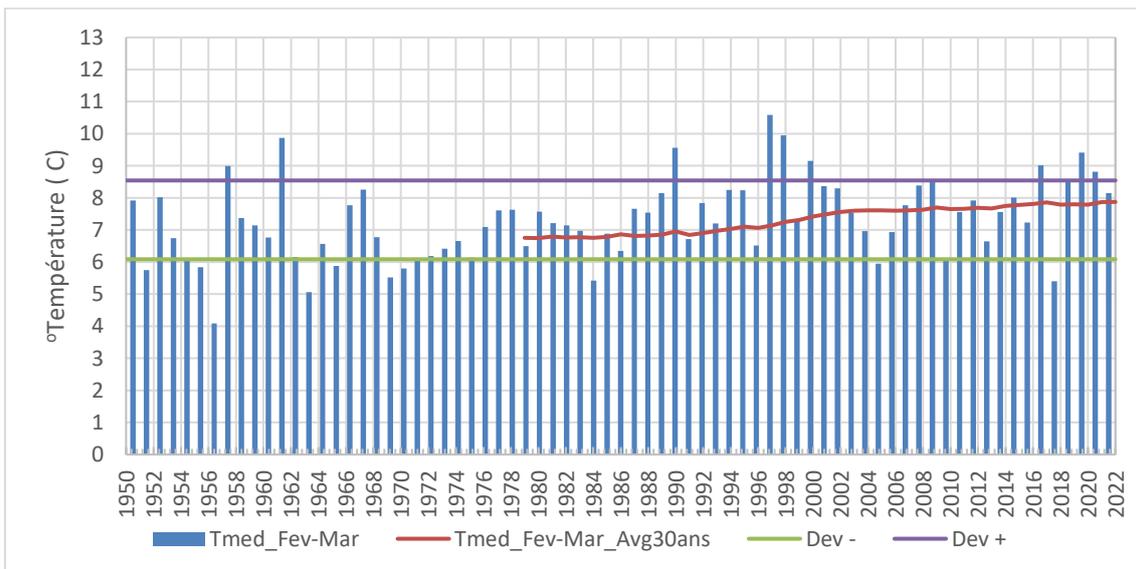


Figure 29 : Évolution de la température moyenne des mois de février et mars à la station météorologique de Bragança (Portugal) au cours de la période 1950-2022. Les lignes rouge et verte représentent respectivement les moyennes mobiles sur 30 ans et sur 5 ans.

L'évolution de la température minimale absolue en avril montre une tendance à la hausse, en particulier au cours des deux dernières décennies (Figure 30). Si l'on considère la moyenne mobile sur 30 ans, on constate une augmentation d'environ 1°C en comparant la moyenne 1950-1979 à la moyenne 1993-2022.

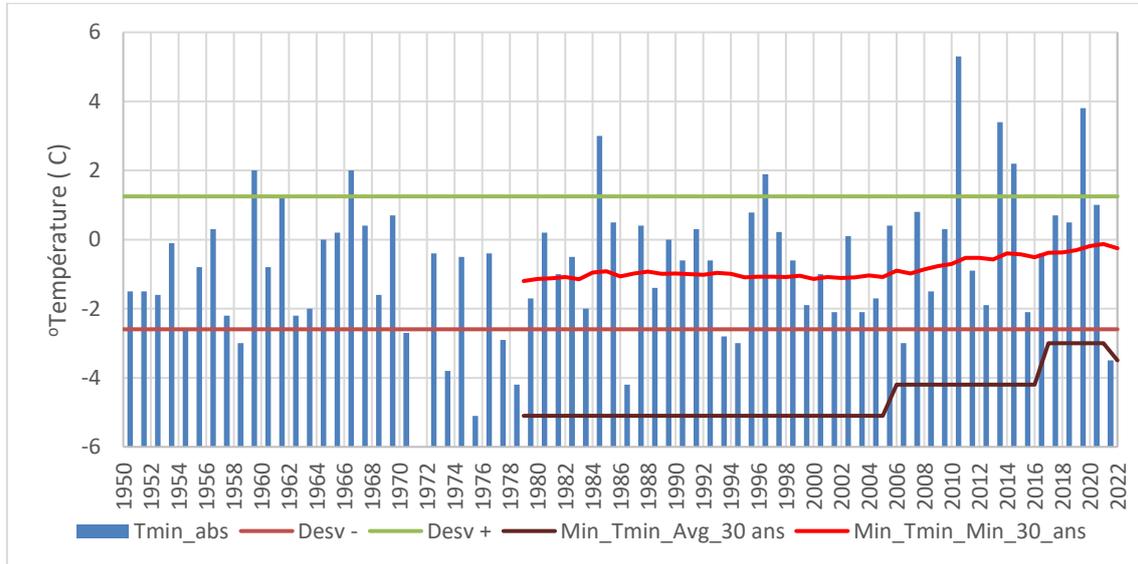


Figure 30 : Évolution de la température minimale absolue en avril à la station météorologique de Bragança (Portugal) au cours de la période 1950-2022. Les colonnes représentent la température minimale absolue, la ligne rouge représente la moyenne mobile (30 ans) et la ligne noire représente le minimum des températures minimales absolues des 30 années précédentes.

L'occurrence du gel dans le nord-est du Portugal, malgré la grande variabilité interannuelle, a diminué au cours des dernières décennies (Figure 31). Cette tendance à la baisse a été particulièrement marquée au cours de la dernière décennie (2012-2022).

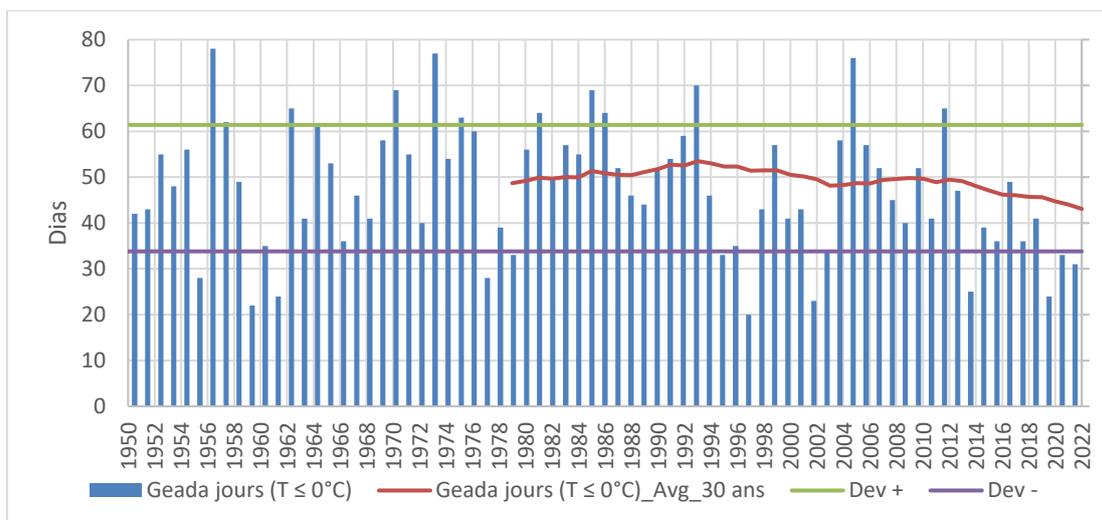


Figure 31 : Évolution du nombre de jours de gel ($T \leq 0^{\circ}\text{C}$) au cours de la période 1950-2022. La ligne rouge représente la moyenne mobile sur 30 ans.

Le mois d'avril a également été marqué par une tendance à la baisse de l'occurrence des gelées (Figure 32). L'analyse de la série des températures minimales montre qu'en plus d'une diminution de la fréquence des gelées en avril, leur sévérité est également moindre.

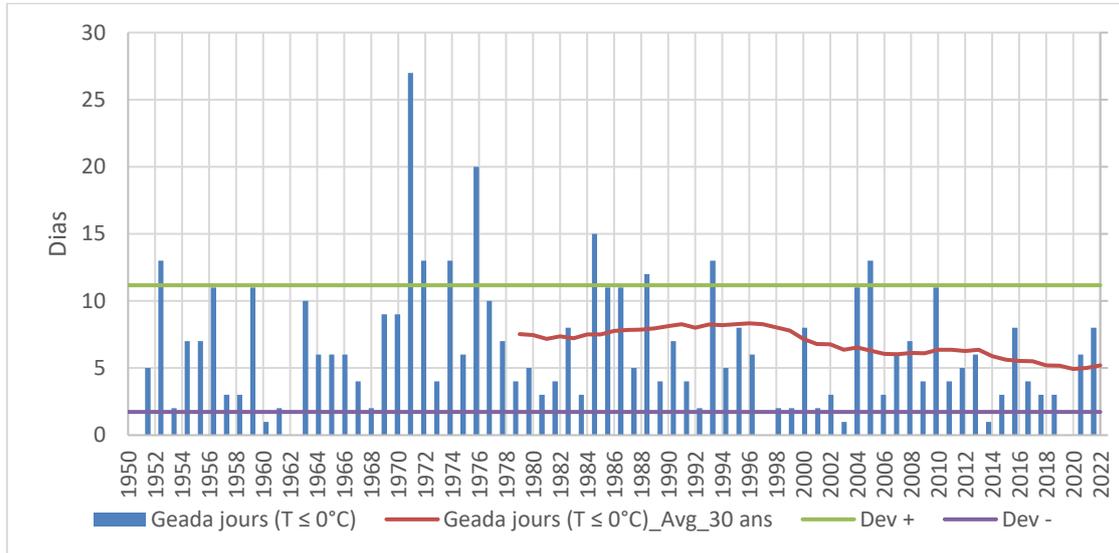


Figure 32 : Évolution du nombre de jours de gel ($T \leq 0^{\circ}\text{C}$) en avril au cours de la période 1950-2022. La ligne rouge représente la moyenne mobile sur 30 ans.

En analysant la série de températures de Bragança pour la période 1950-2022, nous observons, surtout dans les dernières décennies, une tendance à la hausse de la température moyenne annuelle. En ce qui concerne les températures minimales et la fréquence des gelées, on observe une tendance à l'augmentation de la température minimale et une diminution de la fréquence des gelées au cours des mois de printemps.

Les projections climatiques (scénario RCP8.5) pour le nord-est du Portugal estiment une augmentation de la température moyenne annuelle de $2,2^{\circ}\text{C}$ à $2,9^{\circ}\text{C}$ (2041-2070) et de $4,0^{\circ}\text{C}$ à $4,8^{\circ}\text{C}$ (2071-2100). Pour le printemps, les températures moyennes devraient augmenter de $1,8^{\circ}\text{C}$ à $2,2^{\circ}\text{C}$ (2041-2070) et de $3,4^{\circ}\text{C}$ à $3,9^{\circ}\text{C}$ (2071-2100). Pour la température minimale de printemps, les projections prévoient une augmentation de $1,8^{\circ}\text{C}$ (2041-2070) et de $3,2^{\circ}\text{C}$ - $3,3^{\circ}\text{C}$ (2071-2100). Les projections concernant le nombre moyen annuel de jours de gel indiquent une réduction de 26 à 54 jours.

B.4.2. Sous-région Centre du Portugal - Viseu Dão Lafões: caractérisation du climat actuel et tendances

B.4.2.1. Introduction

La Communauté Intermunicipale de Viseu Dão Lafões a promu l'élaboration du Plan Intermunicipal d'Adaptation au Changement Climatique de Viseu Dão Lafões (PIAAC Viseu Dão Lafões), avec la participation et le soutien des 14 municipalités de cette sous-région et d'autres entités publiques et privées opérant sur ce territoire. Ce plan est la source de l'information présentée dans ce document, qui se réfère à la caractérisation et aux tendances du climat actuel pour le territoire de Viseu Dão Lafões, sur la base de la caractérisation climatique de la période entre 1971 et 2017.

L'objectif principal du PIAAC de Viseu Dão Lafões est de mieux comprendre le phénomène du changement climatique au niveau local et sous-régional et, en même temps, d'identifier les

actions nécessaires pour l'adaptation des populations, des organisations et des services publics et privés. Il vise également à promouvoir l'intégration de l'adaptation dans la planification intercommunale et municipale et la création d'une culture de coopération en matière d'adaptation entre les différents secteurs et acteurs, renforçant ainsi la résilience territoriale.

Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat de Viseu Dão Lafões est « Csb - climat tempéré avec des étés doux et secs ». Ses caractéristiques orographiques protègent la sous-région des flux humides en provenance de l'Atlantique, et ses caractéristiques climatiques reflètent donc une certaine continentalité.

Étant donné que les types de relief, ainsi que les formes d'occupation et l'occupation du sol, sont des aspects déterminants pour caractériser et comprendre les conditions climatiques qui affectent Viseu Dão Lafões, on a défini les « Unités homogènes de réponse climatique » (UHCR), communément appelées climatopos, qui, en termes méthodologiques, permettent une lecture spatiale du climat actuel et futur du territoire.

Les températures moyennes des mois les plus froids (janvier) et les plus chauds (juillet) varient entre 7,1°C et 21,7°C. L'amplitude thermique annuelle est d'environ 15°C. En termes de thermo-pluviométrie, il existe de grands contrastes entre les reliefs occidentaux (chaînes montagneuses de Caramulo et de Gralheira), où les précipitations moyennes annuelles dépassent les 2 000 mm, tandis qu'au sud-est de Viseu, les totaux varient entre 900 mm et 1 200 mm, avec moins de 900 mm dans la partie orientale de la sous-région.

Toutefois, les tendances ont évolué. La température moyenne de l'air montre une tendance à la hausse, allant de +0,27°C/décennie à +0,36°C/décennie. Cette augmentation est principalement due à la hausse de la température moyenne au printemps (entre 0,41°C/décennie et 0,79°C/décennie) et en été (entre +0,53°C/décennie et +0,68°C/décennie). En hiver et en automne, les changements de température sont moins importants. Une tendance à la hausse est également observée pour les jours très chauds (jours avec une température maximale égale ou supérieure à 35°C) et les jours d'été (jours avec une température maximale égale ou supérieure à 25°C).

Quant aux précipitations, la tendance est à la baisse en été et à la hausse en automne, bien que l'expression statistique ne soit pas observée dans toutes les URCH de la sous-région. Le nombre de jours avec précipitations (jours avec précipitations totales égales ou supérieures à 1 mm) a tendance à augmenter de quatre ou cinq jours supplémentaires en automne. En ce qui concerne les jours avec 10 mm ou plus de précipitations, des tendances significatives sont détectées en été (diminution) et en automne (augmentation), bien qu'elles ne s'étendent pas à l'ensemble du territoire.

B.4.2.2. Scénarios climatiques

La dininisation du climat est le résultat de la collecte et du traitement d'informations sur le climat futur (projections) à l'aide de différents modèles et pour différents scénarios climatiques mondiaux, et constitue un support important pour l'identification des changements possibles du climat futur. Il convient de noter qu'un scénario climatique est toujours une simulation numérique du climat futur, basée sur des modèles de circulation générale de l'atmosphère et sur la représentation du système climatique et de ses sous-systèmes.

Pour réaliser cet exercice de projection, nous avons utilisé les informations disponibles auprès de deux sources fondamentales, à savoir l'INSTITUT PORTUGAIS DE LA MER ET DE L'ATMOSPHÈRE (Portail Climat) et EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment - European Domain)

An-Gel Sudoe

Les projections climatiques au milieu du siècle (2041-70) pour l'ensemble de Viseu Dão Lafões sont présentées dans la figure ci-dessous.

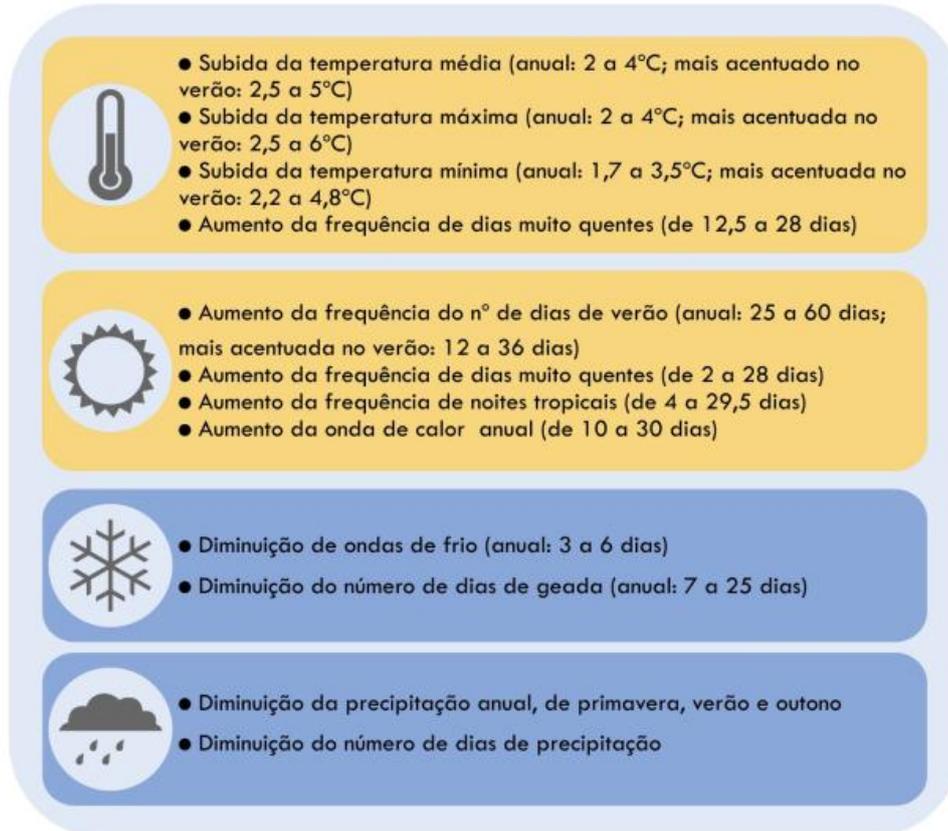


Figure - Scénarios climatiques pour Viseu Dão Lafões (2041-2070)

B.5. Conclusions

L'effet du changement climatique sur le risque de gel est encore étudié dans différentes régions du monde. En général, une augmentation de la température moyenne, une diminution du nombre annuel de jours de gel et une incidence plus faible du gel au printemps ont été observées dans toutes les régions. Cependant, un débourrement et une phénologie plus précoces de toutes les espèces d'arbres ont également été clairement observés, ce qui les rend beaucoup plus sensibles aux épisodes de gel tardif.

Par conséquent, l'effet du réchauffement climatique est susceptible d'entraîner une diminution du nombre de gelées de printemps, mais lorsqu'elles se produisent, elles peuvent être beaucoup plus sévères en raison du plus grand nombre de cultures au stade sensible qui seront présentes à ce moment-là.

Références

- AEMET (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5, NIPO: 014-17-010-8 <https://doi.org/10.31978/014-17-010-8> Madrid.
- AEMET (2021). Rapport sur l'état du climat en Espagne 2021. <https://doi.org/10.31978/666-22-006-X>. Madrid.
- Bednar-Friedl, B., R. Biesbroek, D. N. Schmidt, P. Alexander, K. Y. Børshiem, J. Carnicer, E. Georgopoulou, M. Haasnoot, G. Le Cozannet, P. Lionello, O. Lipka, C. Möllmann, V. Muccione, T. Mustonen, D. Piepenburg et L. Whitmarsh, (2022) : Europe. Dans : Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution du groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK et New York, NY, USA, pp. 1817-1927, doi:10.1017/9781009325844.015.
- Copernicus Data Store (2024). <https://cds.climate.copernicus.eu#!/home> Consulté le 16 juillet 2024
- Programme Copernicus, The (2021). Gelée printanière tardive. Résumé de l'état du climat en Europe en 2021
- García-Martín, A.; Paniagua, L.L.; Moral, F.J.; Rebollo, F.J.; Rozas, M.A. (2021). Analyse spatio-temporelle du régime de gel dans la péninsule ibérique dans le contexte du changement climatique (1975-2018). Sustainability,13,8491. <https://doi.org/10.3390/su13158491>
- Díaz, R., Johnsen, Ø.; Fernández-López, J. (2009). Variation in spring and autumn freezing resistance among and within Spanish wild populations of *Castanea sativa*. Annales des sciences forestières, 66(7), 1-12.
- Fauriel, J. (2001). Le châtaignier en agriculture biologique. Techn'lab arboriculture. 4p.
- Fu, Y.S.H. ; Campioli, M. ; Vitasse, Y. ; De Boeck, H.J. ; Van Den Berge, J. ; AbdElgawad, H. ; Asard, H. ; Piao, S. ; Deckmyn, G. ; Janssens, I.A. (2014). Variation in leaf flushing date influences autumnal senescence and next year's flushing date in two temperate tree species. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 111, 7355-7360. <https://doi.org/10.1073/pnas.1321727111>
- García-Martín, A., Paniagua, L.L., Aguirado, C. et Guerra, E. (2023). Tendances des températures hivernales minimales et date de la dernière gelée de printemps dans les principales régions fruitières d'Espagne. Acta Hortic. 1372, 215-222. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1372.28>
- Huang, J. ; Hitchcock, P., Maycock ; A.C. *et al.* (2021). Northern hemisphere cold air outbreaks are more likely to be severe during weak polar vortex conditions. *Commun Earth Environ* 2, 147. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00215-6>

An-Gel Sudoe

- Jones, C., Griffin, G. J., & Elkins, J. R. (1980). Association of climatic stress with blight on Chinese chestnut in the eastern United States. *Plant Disease*, 64(11), 1001-1004.
- Lheureux, F. 2023. La châtaigne. Monographie. Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris, France. 334p.
- Mouravy, M. 2021. Le gel sur châtaignier - Sensibilités, physiologie et variétés. La journée de la châtaigne, Mazeyrolles, France.
- Leolini, L. ; Moriondo, M. ; Fila, G. ; Costafreda-Aumedes, S. ; Ferrise, R. ; Bindi, M. (2018). Late spring frost impacts on future grapevine distribution in Europe, *Field Crops Research*, Volume 222, 2018, Pages 197-208, ISSN 0378-4290, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.018>
- Olschewski, P. ; Diarra, M. ; Dieng, B. ; Moutahir, H. ; Böker, B. ; Haas, E. ; Kunstmann, H. ; Laux, P. (2024). Amplified potential for vegetation stress under climate-change-induced intensifying compound extreme events in the Greater Mediterranean Region (Potentiel amplifié de stress de la végétation sous l'effet du changement climatique et de l'intensification des événements extrêmes composés dans la grande région méditerranéenne). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 24, 1099-1134. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1099-2024>
- Osaer, A., P. Vaysse, J.F. Berthoumieu, A. Audubert et M. Trillot (1998). Gel de printemps, protection des vergers. Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris, France. 151p.
- Sanz, M.J. et Galán, E. (eds.), (2020). Impacts et risques liés au changement climatique en Espagne. Bureau espagnol du changement climatique. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.
- Schaberg, P. G. , Murakami, P. F. , Collins K. M. , Hansen C. F. , Hawley G. J. Phenology, cold injury and growth of American chestnut in a Range-Wide provenance test, *Forest Ecology and Management*, Volume 513, 2022, 120178, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120178>
- Visionneuse de scénarios de changement climatique. Projet AdaptateCCa (2024). <https://escenarios.adaptecca.es/info> . Consulté le 16 juillet 2024
- Zohner, C.M. ; Mo, L. ; Renner, S.S. ; Crowther, T.W. (2020). Le risque de gel à la fin du printemps entre 1959 et 2017 a diminué en Amérique du Nord mais a augmenté en Europe et en Asie. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* , 117, 12192-12200.

C. Épisodes de gel pertinents au cours des dernières années

Cette section décrit les épisodes de gel les plus importants qui se sont produits ces dernières années dans les différentes régions du projet. Dans le cas des régions espagnoles, les études de probabilité de gel dans les différentes zones sont ajoutées dans des annexes spécifiques.

C.1. Espagne

C.1.1. Région de Murcie

La région de Murcie a connu plusieurs épisodes de gel importants ces dernières années :

Date : 23-24 janvier 2023

- Type de gel : Coup de froid polaire
- Températures minimales atteintes : -4°C à Cieza, dans la Vega Alta et dans les environs de Calasparra, où se concentre la plus grande production régionale de fruits à noyaux extra-précoces. Dans les zones de l'Altiplano et du Nord-Ouest, les records ont été encore plus bas, avec des températures allant jusqu'à -6°C et -7°C, bien que ce type d'arbres fruitiers extra-précoces soit presque inexistant dans ces zones.
- Estimation des dégâts sur les différentes cultures : 40 % de la floraison touchée. Les variétés de fruits à noyaux les plus touchées sont les variétés très précoces de pêches et de nectarines, ainsi que quelques abricots et pêches plates.
- Systèmes de défense: combustion de paraffine, micro pluie artificielle et tours à vent.

Date : 10-12 janvier 2019

- Type de gel : vague de froid polaire en provenance d'Europe du Nord
- Températures minimales atteintes : entre -7.9°C et -6.2 °C dans la zone de l'Altiplano, Caravaca et Jumilla. Murcie et Carthagène entre -0,5°C et -1°C.
- Estimation des dommages : Les variétés de fruitiers à noyaux les plus touchées sont les variétés très précoces de pêches et de nectarines, ainsi que certaines variétés d'abricots et de pêches plates. Dommages aux cultures d'artichauts, de laitues, de choux et de brocolis.
- Les systèmes de défense utilisés : brûlage de paraffine, production artificielle de micro-pluie et tours à vent, couvertures thermiques ont également permis de sauver certaines cultures à Alhama de Murcia.

Événements de gel entre 2004 et 2015

- Type de gel : Coup de froid polaire
- Au cours de cette décennie, d'autres épisodes de "froid polaire" ont provoqué des gelées qui ont affecté les agrumes de la région, entre autres cultures. Les gelées les plus importantes se sont produites au cours des hivers 2004-05, 2010-11, 2011-2012 et 2014-15. Lors de ces événements, les températures dans les zones de culture des agrumes sont tombées en dessous de -3°C et ont causé de grandes pertes, en particulier chez les citronniers, qui sont l'une des espèces les plus sensibles. Au cours de la campagne 2010-2011, il y a eu cinq gelées, avec des températures inférieures à -2°C. Au cours de la campagne 2011-12, des gelées ont été enregistrées les 8 et 9 février 2012, atteignant -4°C le 8 dans certaines zones de culture d'agrumes et causant de graves dommages aux arbres et aux fruits, en particulier aux jeunes citronniers, avec des minimums absolus atteignant -6°C le 9, et dans certaines zones restant plus de 10 heures en dessous de 0°C. Au cours de la saison 2014-15, un gel a été enregistré du 29 décembre au 1er janvier, entraînant des

températures minimales comprises entre - 2°C et - 5°C dans les zones d'agrumiculture de la région de Murcie.

C.1.2. Pays Basque

Au Pays Basque, ce projet se concentre sur la province d'Alava. La province d'Alava peut être considérée comme un condensé du Pays Basque en termes de climat, à l'exception de l'environnement côtier. Le Pays Basque est situé dans la zone tempérée dominée par les vents d'ouest, dans la frange méridionale des vents d'ouest. Il fait partie de la rive occidentale du continent européen et son climat est influencé par des courants marins chauds et des vents d'ouest. La combinaison de tous ces aspects fait que son climat prédominant est animé par les centres d'action atlantique, méditerranéen et européen, dont le rythme impose les types de temps caractéristiques.

La province d'Alava présente une transition latitudinale dans son environnement physique, passant d'un environnement cantabrique à un environnement méditerranéen. Cependant, cette transition ne couvre pas l'ensemble du territoire, mais se limite aux régions centrales. Cette transformation n'est pas du tout graduelle, mais se fait par petits sauts brusques, changements de direction, avancées et reculs. Le nord de la province d'Alava (vallées d'Ayala et d'Aramayona) a un climat océanique, avec des températures modérées tout au long de l'année (température moyenne annuelle de 13 °C, et oscillation thermique annuelle de 11°C). Cependant, la majeure partie du territoire de l'Alava présente des conditions climatiques de transition entre le climat océanique du nord et le climat méditerranéen continental du sud. Les températures sont donc plus extrêmes que dans la zone océanique, avec des hivers plus froids et des étés plus chauds, et une température moyenne annuelle comprise entre 11 et 12°C. La zone de la dépression de l'Èbre occupée par la Rioja Alavesa, dans la partie la plus méridionale de la province, se caractérise par un climat aux étés secs et chauds de type méditerranéen. Le climat de cette zone est considéré comme méditerrané-continental, en raison des basses températures enregistrées pendant les mois d'hiver. L'influence océanique est beaucoup moins importante que dans la zone de transition, de sorte que les oscillations thermiques interannuelles sont plus marquées.

En Alava, les gelées surviennent généralement entre novembre et avril, bien que la période sans gel et l'apparition des premières gelées d'automne et des dernières gelées de printemps varient d'une région à l'autre. Compte tenu des caractéristiques climatiques et des particularités agronomiques des cultures les plus courantes dans cette zone, la date à laquelle surviennent les premières gelées d'automne et les dernières gelées de printemps est particulièrement importante. Des dommages peuvent aussi parfois être causés par des températures extrêmement basses, mais normalement ces pics de température minimale se produisent à des moments où les cultures, qu'elles soient ligneuses ou herbacées, sont en dormance hivernale, de sorte que les effets de ces événements ne sont généralement pas significatifs. Toutefois, la première gelée d'automne, selon la date à laquelle elle se produit, peut avoir un effet très important sur les cultures herbacées extensives telles que le colza, qui doit atteindre la dormance hivernale en état de rosette pour ne pas être affecté par les températures minimales extrêmes. D'autre part, les gelées de printemps peuvent affecter de manière significative les cultures ligneuses (comme la vigne) ou les cultures arables (comme le colza), c'est pourquoi la détermination de la date de la dernière gelée de printemps est très importante.

C'est pourquoi l'annexe de ce rapport présente des graphiques qui permettent d'estimer les probabilités de ce type de gelée clé et de la période sans gel. L'estimation de la probabilité a été réalisée à l'aide de fonctions de probabilité cumulées à partir de la distribution normale de la date de la première gelée d'automne et de la dernière gelée de printemps (test préalable de

Kolmogorov-Smirnov), afin de certifier la normalité de la distribution des dates de gel). Ces graphiques ont été élaborés à partir de séries historiques (1971-2015) provenant de 9 endroits différents de la zone d'étude.

L'annexe présente également des graphiques montrant la durée (en minutes) et la température minimale des gelées qui se sont produites à ces endroits au cours de la période (2004-2017).

²En ce qui concerne les gelées printanières historiques dans les vignobles de la Rioja Alavesa, on peut citer celle qui s'est produite tôt le matin du **16 avril 1999**, qui a gelé pratiquement tous les vignobles de l'appellation d'origine. ³Plus récemment, une autre gelée s'est produite dans la nuit du **28 avril 2017**, qui a principalement touché la Rioja Alavesa et la Rioja Alta. ⁴Cette année **2024** a également gelé aux premières heures des **17 et 18 avril** et a touché quelque 1 186 ha de vignobles dans l'Álava, ce qui correspond à environ 10 % de la superficie viticole de la Rioja Alavesa. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une gelée de printemps, il convient de rappeler les températures froides **du mois de février 1956**, qui a connu trois vagues de froid consécutives. Au cours de ce mois, de nombreuses pinèdes de l'espèce *Pinus Insignis* ont gelé, après un mois de janvier très doux où les pins poussaient déjà dans les vallées centrales et orientales du Gipuzkoa. D'autres espèces fruitières comme les figuiers et les noyers ont également gelé, ainsi que des navets (communication personnelle).

C.1.3. Lleida

Les gelées de printemps sont fréquentes dans la région de Lleida et, par extension, dans d'autres zones de la vallée moyenne de l'Èbre (Aragon et Catalogne). Dans ces zones, les cultures les plus touchées par ces gelées sont les arbres fruitiers et, dans une moindre mesure, les vignobles.

La production fruitière est l'une des principales activités agricoles de la vallée de l'Èbre, en termes de poids économique, de surface occupée par les cultures, d'emplois générés et d'orientation vers l'exportation.

La Catalogne est la plus importante zone de production de fruits en Espagne et, parallèlement, le neuvième producteur mondial de pêches et de nectarines, le dix-huitième producteur de poires et le trente-septième producteur de pommes. Selon les dernières données (2020), la Catalogne compte quelque 44 000 hectares consacrés aux fruits.

Pratiquement toutes les espèces de ces groupes de cultures sont plus ou moins sensibles aux effets des gelées printanières qui se produisent en mars et en avril, période qui coïncide avec celle de la floraison et de la nouaison.

Ces dernières années, avec la présence d'hivers plus chauds que ceux habituellement observés, la pleine floraison a été avancée dans la plupart des cultures, dans certains cas jusqu'à 5-10 jours plus tôt que les dates moyennes historiques. De ce fait, les espèces se trouvent plutôt à des stades phénologiques plus sensibles aux effets des basses températures (inférieures à 0°C).

En **2024 (23 et 24 avril)**, il y a eu un gel d'ampleur moyenne qui a affecté principalement les zones basses le long des rivières, qui sont naturellement plus sujettes à l'incidence de ces phénomènes, atteignant -4°C dans les points les plus défavorables. L'impact a varié en fonction de la localisation

² [Les dégâts causés par les gelées pourraient conduire à classer la Rioja Alavesa et la Ribera Navarra comme zones catastrophiques | Noticias del País Vasco | EL PAÍS \(elpais.com\)](#)

³ <https://www.noticiasdealava.eu/alava/2017/05/12/helada-rioja-alavesa-fuera-fondo-1401561.html>

⁴ [Dégâts en Alava : les dernières gelées affectent 1 186 hectares de vignobles dans la Rioja Alavesa \(noticiasdealava.eu\)](#)

des parcelles et s'est situé entre 15 et 70 % des cultures fruitières. ⁵La semaine précédente (14 avril) avait été marquée par des records de température allant jusqu'à 30°C dans plusieurs stations. En raison de la date tardive des gelées et de la phénologie précoce des cultures, des dégâts importants ont été enregistrés dans certaines zones de vignobles et de céréales, qui ne sont pas habituellement touchées.

Le dernier épisode de gelées printanières très intenses s'est produit entre le **2 et le 4 avril 2022**, provoquant des dégâts très importants et généralisés dans la zone fruitière de la vallée de l'Èbre, sur un large éventail d'espèces, y compris certaines, comme le figuier, où ce type de dégâts ne se produit généralement pas.

⁶Selon les données d'Agroseguro, dans la région de l'Aragon et de la Catalogne, 70 % de la superficie assurée d'arbres fruitiers (32 000 ha) a été touchée, avec une prévision d'indemnisation de 245 millions d'euros.

Le gel a débuté le 2 avril par une advection d'air froid d'origine polaire avec présence de vent. Cependant, les dégâts les plus importants se sont produits dans les nuits du 3 et du 4 avril, lorsque le vent s'est calmé. À partir de ce moment, avec des conditions d'accumulation d'air froid et un ciel dégagé, d'intenses gelées de rayonnement se sont produites avec des valeurs minimales d'environ -6°C qui ont causé de très graves dommages aux cultures fruitières qui étaient au stade de la nouaison et des petits fruits.

En **2021**, des gelées se sont également produites dans certaines zones de la région fruitière de Lleida à la suite d'un afflux d'air polaire au début du **mois d'avril (jours 5 et 6)**. Dans ce cas, les effets se sont concentrés uniquement sur les zones les plus défavorables (creux) et sur les cultures les plus sensibles comme les abricotiers et les amandiers, causant dans ces zones des dommages compris entre 20 et 100 %.

Un anticyclone à l'ouest des îles britanniques et une zone de basse pression entre le golfe de Gênes et les Alpes poussent le vent du nord qui provoque l'arrivée d'air très froid d'origine arctique dans la vallée de l'Ebre.

⁵ Extensius.cat. Baixada de les temperatures i glaçades. com poden afectar al cereal d'hivern. 29 abril 2024
<https://extensius.cat/2024/04/29/baixada-de-les-temperatures-i-glacades-com-poden-afectar-al-cereal-dhivern/>

⁶ Joana, F.J. (2022) Valoració i evolució de les gelades. Jornada Tècnica Fira Agrària Sant Miquel ; Lleida.
https://ruralcat.gencat.cat/c/document_library/get_file?uuid=df71b476-7e22-48d2-88c1-ca0b27c3125f&groupId=20181

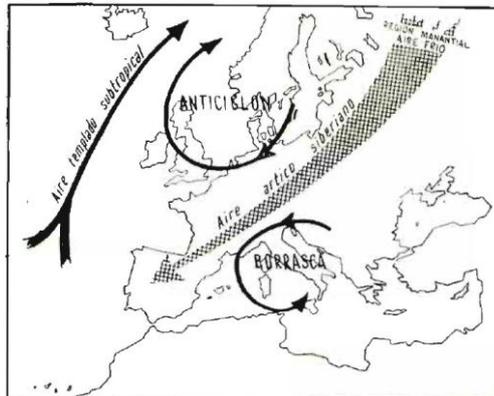


Figure 33 : Diagramme de la circulation atmosphérique en conditions de gel dans la vallée de l'Èbre. Source: Hojas divulgadoras (1962)

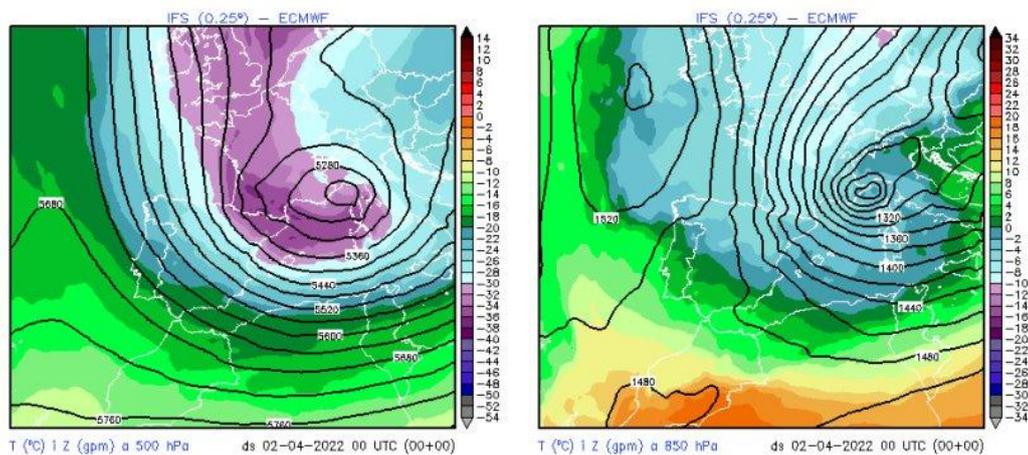


Figure 34 : Situation météorologique avant les gelées d'avril 2022. A gauche: températures à une altitude de 500 hPa (5500 m) et 850 hPa (1500 m). Source : Meteocat.

Parmi les gelées considérées comme historiques en raison de l'ampleur et de l'étendue des dégâts causés, il convient de souligner celle qui s'est produite les **21 et 22 avril 1991**.⁷ Les pertes dans le secteur fruitier de la vallée de l'Ebre sont les mêmes que celles causées par le dernier épisode de 2022.

Si nous remontons dans le temps, en 1977, il y a eu un gel de printemps qui s'est produit en deux épisodes, du 29 au 31 mars (température minimale de Lleida -1,5°C) et du 9 au 11 avril de la même année (température minimale de Lleida 0,8°C), ce qui a provoqué des pertes considérables dans la production fruitière.

Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas de gelées de printemps, en février 1956, les températures ont été inférieures à 0°C pendant 25 jours consécutifs, avec des températures minimales inférieures à -10°C pendant trois jours consécutifs. Ces gelées ont été dévastatrices pour l'oléiculture.

⁷ Federació de Cooperatives de Catalunya. Les gelades d'avril aturen parcialment les cooperatives (5-12-22). <https://www.cooperativesagrari.cat/ca/noticies/2779-les-gelades-dabril-aturen-parcialment-les-coo.html> . Consulté le 27-5-24

C.2. France.

C.2.1. Sud-ouest de la France. Zone de culture de la châtaigne

Au cours des huit dernières années, les châtaigneraies du sud-ouest de la France ont subi trois grandes gelées de printemps.

En **2017**, de fortes gelées survenues les **19 et 21 avril et entre les 27 et 29 avril** ont touché plusieurs exploitations. ⁸L'impact de ces gelées a été aggravé par le fait que les châtaigniers avaient été plantés tôt cette année-là (deux semaines plus tôt que la normale pour la saison) . Pour les producteurs touchés, les gelées ont représenté 30 à 80 % des pertes de récoltes⁸⁹. Toutefois, l'intensité des gelées a été très variable et les dégâts n'ont pas été généralisés à l'ensemble de la région. L'utilisation de systèmes de défense n'a pas été signalée à l'époque.

Le printemps **2021** a été marqué par de fortes gelées pendant une période sèche, avec des températures allant jusqu'à -5°C et -7°C **entre le 6 et le 13 avril** pendant plusieurs nuits. Ces gelées ont affecté les boutons floraux, impactant les rendements des exploitations touchées. ¹⁰Pour la deuxième année consécutive, la production régionale a subi une baisse de rendement de 15 à 30 % par rapport à une année normale (2019).

En **2024**, une gelée de printemps a touché certaines localités de Corrèze, Haute-Vienne, Dordogne, Lot et Cantal. Les températures minimales enregistrées ont varié de -2,5°C à -1,1°C, voire -6°C dans certaines localités, entre le **19 et le 24 avril**.¹¹Les dégâts visibles semblent affecter principalement le feuillage et quelques bourgeons à fruits. Le bulletin technique châtaignier du Sud-Ouest qui a précédé ce gel a rappelé les types de gel et les mesures prophylactiques recommandées pour mieux protéger les sites les plus exposés et les jeunes arbres. Le bilan en fin de campagne 2024 permettra de savoir si ce gel a eu un impact significatif sur la récolte.

C.2.2. Moyenne Garonne

La section B.3.1 décrit l'évolution climatique de la région de la Moyenne-Garonne de 1951 à nos jours. Les années les plus froides et les plus touchées par le gel sont 1956, 1967, 1970, 1991, 2021 et 2022. La première de la série, 1956, est particulièrement remarquable, car dans le contexte d'une vague de froid polaire qui a touché toute l'Europe, des températures inférieures à -20°C ont été atteintes pendant plusieurs jours consécutifs, ce qui a entraîné la perte de nombreuses espèces méditerranéennes dans la région.

Plus récemment, les gelées de 2021 et 2022, survenues au début du mois d'avril, ont également causé des dommages importants à la production fruitière de la région. En 2024, la forte humidité des sols et la présence de nuages et de brouillards a fortement

⁸ Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine. 2018. Bulletin de Santé du Végétal - Grand Sud-Ouest - Châtaignier N°9. Bilan 2017. 4p.

⁹ Union Interprofessionnelle de la châtaigne du Sud-Ouest. 2018. Bulletin d'information de l'Union interprofessionnelle. 13p.

¹⁰ Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine. 2022. Bulletin de Santé du Végétal - Grand Sud-Ouest - Châtaignier N°15. Bilan 2021. 7p

¹¹ Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine. 2024. Bulletin de Santé du Végétal - Grand Sud-Ouest - Châtaignier N°1. 8p.

réduit le risque et les dégâts sont restés limités aux contreforts du Massif-Central vers le Lot et la Dordogne.

C.1. Portugal

Dans le nord-est du Portugal, les gelées de printemps sont assez fréquentes et causent des dégâts importants. Dans la région de Carrazeda de Ansiães (Bragança), où la culture fruitière est l'activité agricole la plus importante, en particulier la production de pommes, les gelées printanières tardives causent des dommages importants. Les épisodes les plus récents de gelées printanières (avril) ayant causé des dommages importants aux cultures fruitières ont été les suivants :

- En **2024, le 9 avril**, il y a eu une gelée de $-1,6^{\circ}\text{C}$ qui a causé des dommages importants aux variétés telles que 'Granny Smith', qui étaient dans leur phase phénologique la plus sensible (fin de la floraison/maturation).
- En **2023, le 13 avril**, il y a eu une gelée de $-3,4^{\circ}\text{C}$ qui a causé environ 40% de dégâts.
- Le gel de printemps ayant causé les dégâts les plus importants s'est produit le **21 avril 2022** avec une température minimale de -4°C . Au début du mois d'avril 2022 (2 et 6 avril), les températures minimales étaient respectivement de $-6,6^{\circ}\text{C}$ et $-4,4^{\circ}\text{C}$.

Malgré la diminution des cas de gel, en particulier au cours des deux dernières décennies, les épisodes de gel les plus récents mentionnés ci-dessus ont accru l'inquiétude et l'intérêt des producteurs pour l'application de méthodes de protection contre le gel.

C.2. Annexes

C.2.1. Région de Murcie. Zonage du risque de gel

La probabilité et le risque que les températures causent des dégâts dus au gel varient en fonction de la sensibilité de l'espèce et du groupe variétal. Cette connaissance aide les producteurs à décider si, quoi et quand planter dans un endroit particulier.

L'approche est similaire à celle utilisée par les hydrologues pour déterminer la période de retour des inondations ou par les géologues pour estimer la probabilité et le risque des tremblements de terre. De même, les informations sur la probabilité et le risque de températures minimales sont utilisées pour décider de la possibilité de perdre une récolte à cause du gel, au cours d'une année ou de plusieurs années. Ces possibilités calculées sont utilisées pour décider si la culture doit être plantée, si elle doit être assurée, si une autre culture doit être plantée ou si la protection contre le gel est rentable.

Chez les arbres fruitiers, les températures critiques pour les dommages varient en fonction du stade de développement de la culture, et ces dates varient d'une année à l'autre, de sorte que la détermination de la probabilité et du risque pour les vergers fruitiers est plus compliquée que pour les cultures annuelles. Par exemple, une température critique pour les dommages (T_c) peut être de -7 °C ou moins au stade du débourrement, mais peut augmenter jusqu'à -2 °C ou plus au stade des petits fruits, environ un mois plus tard.

L'analyse de risque est utilisée pour estimer la probabilité qu'un événement dommageable se produise ou non à long terme. Par exemple, un agriculteur souhaite connaître le risque qu'une culture donnée soit perdue à cause du gel pendant la durée de vie prévue de la plantation, en suivant la méthodologie exposée dans la publication 2010 de la FAO: Frost protection : Fundamentals, practice and economics (Protection contre le gel: principes, pratiques et économie) <https://www.fao.org/4/y7231s/y7231s00.htm>

Le polygone cadastral peut servir de base à un zonage de base, classé selon la probabilité moyenne pour les trois groupes finaux définis pour chaque culture et convenus avec l'assureur.

- Groupe I : Extra précoce et Précoce.
- Groupe II : mi-saison et arrière-saison.
- Groupe III : les tardifs.

Pour le zonage final, les polygones ont été caractérisés en fonction d'une série d'indicateurs et des dommages fournis par Agroseguro.

Tableau 1 : Principaux indicateurs de risque de gel retenus dans cette étude et critères de classification des polygones cadastraux.

NIVEAU DE RISQUE	Dommages moyens (%)	Probabilité polygone moyen (%)	Nombre de jours année (T min < 0°C)	Altimétrie (m)	Continentalité (km)
I-Faible	< 5	< 15	< 15	0- 300	< 50
II-Moyen	5-10	15-30	15-25	300 - 500	50-75
III-Haut	> 10	> 30	> 25	> 500	>75

Sur la base des conditions susmentionnées, diverses cartes ont été établies avec le zonage de la région de Murcie pour les trois niveaux de risque établis (Figure 35 y Figure 36).

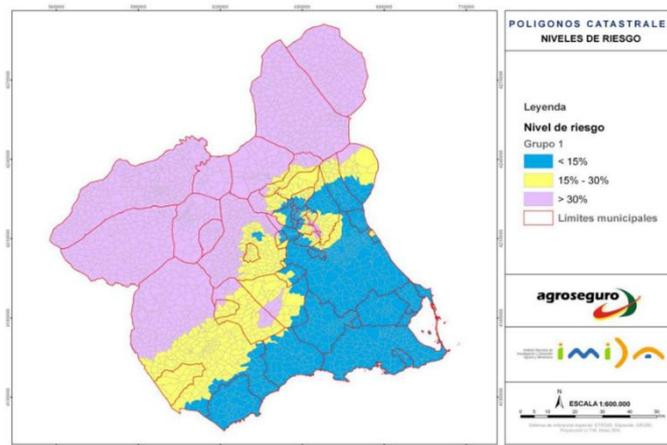


Figure 35 : Zonage des risques climatiques par polygone cadastral : GROUPE I de pêcheurs

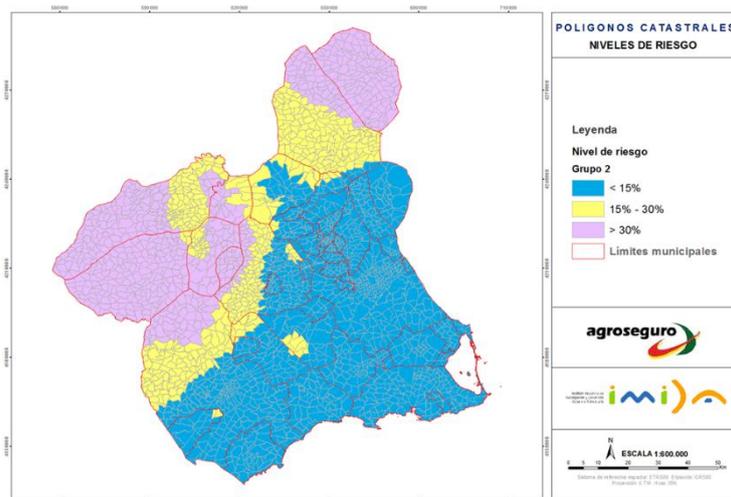


Figure 36 : Zonage des risques climatiques par polygone cadastral : GROUPE II de pêcheurs

C.2.2. Région de Murcie. Études sur le gel

Ces dernières années, plusieurs études ont été publiées sur le risque de gel dans la région de Murcie, qui sont décrites ci-dessous.

Publication : Espín-Sánchez, D., Conesa-García, C. (2021). Changements spatio-temporels des vagues de chaleur et de froid en Espagne (1950-2018) : influence de la configuration de l'Atlantique Est. Geographica Pannonica, 25(3).

Résumé :

La péninsule ibérique présente une orographie complexe qui détermine un gradient altitudinal important et une alternance de vallées et de montagnes, ainsi qu'une advection périodique d'air froid/chaud. Dans la présente étude, l'évolution des caractéristiques des vagues de chaleur (VC) et des vagues de froid (VF) (nombre d'événements, fréquence, durée, magnitude et amplitude) a été analysée. Un total de 28 stations météorologiques d'une période homogène (1950-2018), regroupées en six régions (cluster). Après avoir soumis les séries météorologiques à un processus d'homogénéisation et de contrôle de la qualité des données, divers indices ET-SCI ont été estimés afin d'obtenir des tendances d'évolution dans chaque région climatique. Dans tous les cas, on a observé une augmentation, souvent significative, de la récurrence des événements chauds HW (0,3/10 ans), ainsi qu'une diminution des événements froids CW (-0,2/10 ans). En outre, l'évolution des indices et anomalies susmentionnés a été corrélée à l'évolution de l'indice global de l'Atlantique Est (EAI).

Mots clés : péninsule ibérique ; groupe ; advection ; indices ; téléconnexion ; Atlantique Est

Espín Sánchez, D., Olcina Cantos, J., Conesa García, C. (2022). Satellite thermographies as an essential tool for the identification of cold air pools: an example from SE Spain. European Journal of Remote Sensing, 55(1), 586-603.

Résumé :

Les processus impliqués dans la formation des inversions thermiques nocturnes (NTI) sont d'une grande importance tout au long de l'année, influençant notamment la distribution en surface des températures minimales pendant les nuits de stabilité atmosphérique. La faible densité des stations météorologiques de surface dans la zone d'étude a motivé l'utilisation de la thermographie pour la cartographie et l'identification des bassins d'air froid. La distribution thermique durant les nuits stables conduit à la formation de PAC (Poches d'Air Froid) dans les vallées et les zones déprimées, ainsi que dans les zones où l'air est plus chaud (WAM) (Warm Air Mass) dans les zones orographiquement complexes. Les thermographies utilisant les produits satellitaires AQUA et SUOMI-NPP (MODIS et VIIRS LST) représentent le seul outil capable de radiographier complètement le territoire étudié, surmontant ainsi les limites de l'interpolation des températures minimales de surface. L'objectif principal de la recherche était donc d'évaluer la thermographie en tant qu'outil important pour l'identification des CAPs. Les produits utilisés ont été soumis à une validation statistique avec les températures de surface enregistrées dans les observatoires météorologiques (R 2 0,87/0,88 et Bias -1,2/-1,3) avec le nouvel objectif de réaliser des cartes de distribution thermique dans les processus de stabilité nocturne...

Mots clés : inversion du froid, thermographie, outil de validation

Publication : Sánchez, D. E. (2015). Risque de gel dû à l'inversion thermique dans la huerta de Murcia : Incidence sur l'activité agricole. Investigaciones Geográficas (Esp), (64), 73-86.

Résumé :

Dans le sud-est de la péninsule ibérique, les situations anticycloniques sont fréquentes, alimentées en hiver par l'advection d'air arctique polaire/continental. Dans ces conditions, les bassins fluviaux et les vallées de la péninsule ibérique sont très propices au développement d'inversions thermiques. La Vega Media del Segura en est un exemple clair pendant les mois d'hiver, avec des gelées relativement fréquentes dans des secteurs localisés. En complément de l'étude des facteurs physiques, une étude approfondie est réalisée sur les parcelles agricoles de « *la huerta* » de Murcia et sur les effets possibles des basses températures sur les principales cultures de la zone d'étude, en particulier sur les principaux agrumes. Enfin, une série de mesures antigel actives et passives sont proposées en fonction des caractéristiques de la zone étudiée et d'un système empirique de prévision des températures minimales, afin que les agriculteurs disposent d'outils pour atténuer les effets du gel dans la Vega Media del Segura.

Mots clé : Inversion thermique, strate chaude, Vega Media del Segura, seuil critique, risque, brumisateurs

Espín Sánchez, D. (2022). High-resolution mapping of frost risk : hazard, vulnerability and agricultural exposure (SE Spain). Documents d'anàlisi geogràfica, 68(2), 0279-312.

Résumé

Le risque de gel dans le sud-est de l'Espagne a toujours été synonyme de pertes économiques importantes pour le secteur des fruits et légumes. Dans le bassin hydrographique du Segura (DHS), le secteur agricole représente 8 161 km², soit un peu plus de 43 % de la zone d'étude totale. Les jours de gel, qui apparaissent principalement en raison des processus d'inversion thermique nocturne (ITN), ont une influence sur les cultures périodiquement chaque année. Les facteurs expliquant l'évolution et le calcul du risque de gel (danger, vulnérabilité et exposition) sont analysés d'un point de vue spatio-temporel, avec un accent particulier sur l'analyse de la période de gel (PF) (1950-2020). Les résultats montrent une nette diminution du risque de gel au cours des sept dernières décennies (1950-2020), tandis que la vulnérabilité et l'exposition augmentent dans la zone d'étude. Les mois de mars et d'avril sont les plus à risque, lorsque les amandiers et les céréales pluviales et irriguées sont potentiellement affectés, avec plus de 4 000 km² exposés à un risque important de gel. Une carte mensuelle à très haute résolution du risque de gel a été générée dans le but d'être utile pour la planification agricole future dans la zone d'étude.

Mots-clés : Risque ; Cultures ; Aléas ; Vulnérabilité.

Sánchez, D. E. (2022). Structure verticale et caractéristiques des inversions thermiques nocturnes dans le sud-est de l'Espagne. Cuadernos Geográficos, 61(1), 79-106.

Résumé :

Le sud-est de la péninsule ibérique se caractérise par un nombre important de jours de ciel clair par an. Dans des conditions stables, les processus d'inversion thermique nocturne (NTI) se développent pendant les heures de la nuit, avec une altération verticale et spatiale notable de la distribution thermique de surface. L'objectif principal de la recherche est de quantifier le degré d'importance des processus de stabilité nocturne dans le sud-est de la péninsule, et leur influence sur les températures minimales de surface. Grâce à l'analyse quotidienne des sondages atmosphériques nocturnes dans la ville de Murcie (1986-2015), la stratification verticale, la fréquence, la typologie ou l'intensité des phénomènes ITN sont identifiées. Les résultats indiquent une importance et une prédominance notables tout au long de l'année (83,7% du total), surtout en hiver. En outre, une étude temporelle récente des processus MII et des principales variables qui les déclenchent est réalisée. Enfin, l'analyse est complétée par une caractérisation de la capacité d'inversion des processus nocturnes de stabilité de surface à travers 135 stations météorologiques.

Mots clés : inversion thermique ; stabilité ; sondage ; stratification ; Murcie

Galdón Ruiz, A. (2024). Caractérisation du régime de gel dans la région de Murcie, Espagne.

Résumé

Les agriculteurs de la région de Murcie sont fréquemment touchés par le phénomène du gel, qui a des effets néfastes sur la productivité et le rendement économique. La sagesse agraire leur permet de connaître les meilleurs moments pour semer, mais ils ne sont pas à l'abri des chocs qui perturbent la planification de leurs récoltes. Les compagnies d'assurance agricole ne disposent pas non plus des outils nécessaires pour prévoir suffisamment tôt les désagréments atmosphériques qui génèrent des millions de dollars de pertes dans la campagne murcienne. La caractérisation du régime de gel dans la région de Murcie peut aider le secteur agricole à prendre des décisions qui minimisent les risques. En outre, les primes d'assurance contre le gel payées par les agriculteurs peuvent être plus justes, étant donné qu'il existe des zones où la probabilité de perte est plus faible que dans d'autres.

Mots clés : gel ; Murcie

Erena, M., Brotons, J. M., Conesa, A., Manera, F. J., Castañer, R., Garcia, P. et Porras, I. (2017). Développement d'un géoportail pour l'inventaire et l'évaluation des dommages causés par le gel aux agrumes dans la région de Murcie. In XVIIe Congrès de l'Association espagnole de télédétection.

Résumé :

La recherche présentée vise à développer une infrastructure de données spatiales pour maintenir un inventaire actualisé de la zone agrumicole à l'échelle régionale en utilisant des services de cartographie web, l'estimation du risque de gel sur la base de l'historique d'un réseau de stations agro-climatiques, l'évaluation des dommages en utilisant le SIG/la télédétection et leur comparaison avec les demandes d'indemnisation enregistrées par les compagnies d'assurance agricole au cours des 15 dernières années. La plateforme permet la caractérisation et le zonage

de la production dans les zones agrumicoles et la publication des géoprocessus appliqués à l'évaluation des risques liés au gel à l'échelle du polygone cadastral.

Mots clés : inventaire, agrumes, gel, risque, dégâts.

Pérez Morales, A. (2016). *Risque de gel des cultures. Analyse et évaluation.*

Résumé :

Le gel est l'un des phénomènes atmosphériques qui causent les plus grands dommages économiques à l'activité agricole espagnole. La campagne murcienne est sensible à ces événements en raison d'une série de transformations dans ses formes de production au cours des dernières décennies, qui ont entraîné une augmentation de la vulnérabilité à ce risque. Compte tenu de cette situation, des études de localisation telles que la présente étude sont nécessaires, car elles permettent d'identifier en détail les principaux secteurs à risque en vue de proposer ultérieurement des mesures d'action.

Mots clés : gel, risque, dommages.

C.2.3. Pays Basque. Étude sur le gel dans la région

Dans le Figure 37 montre la localisation géographique des stations météorologiques sélectionnées pour réaliser les études climatiques sur le gel au Pays Basque.



Figure 37 : Localisation des stations sélectionnées au Pays Basque.

De la Figure 38 jusqu'à la Figure 42 les graphiques de la probabilité de gel dans différentes zones du Pays Basque sont présentés.

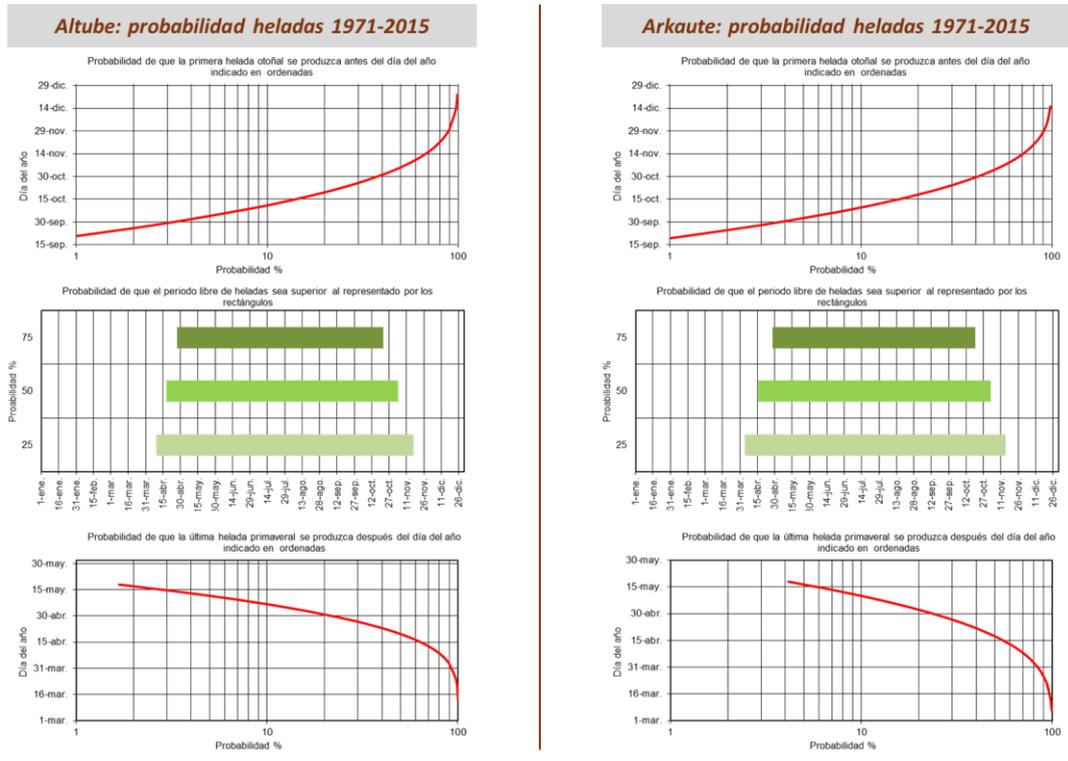


Figure 38 : Probabilité de gelées 1971-2015 : Altube et Arkaute.

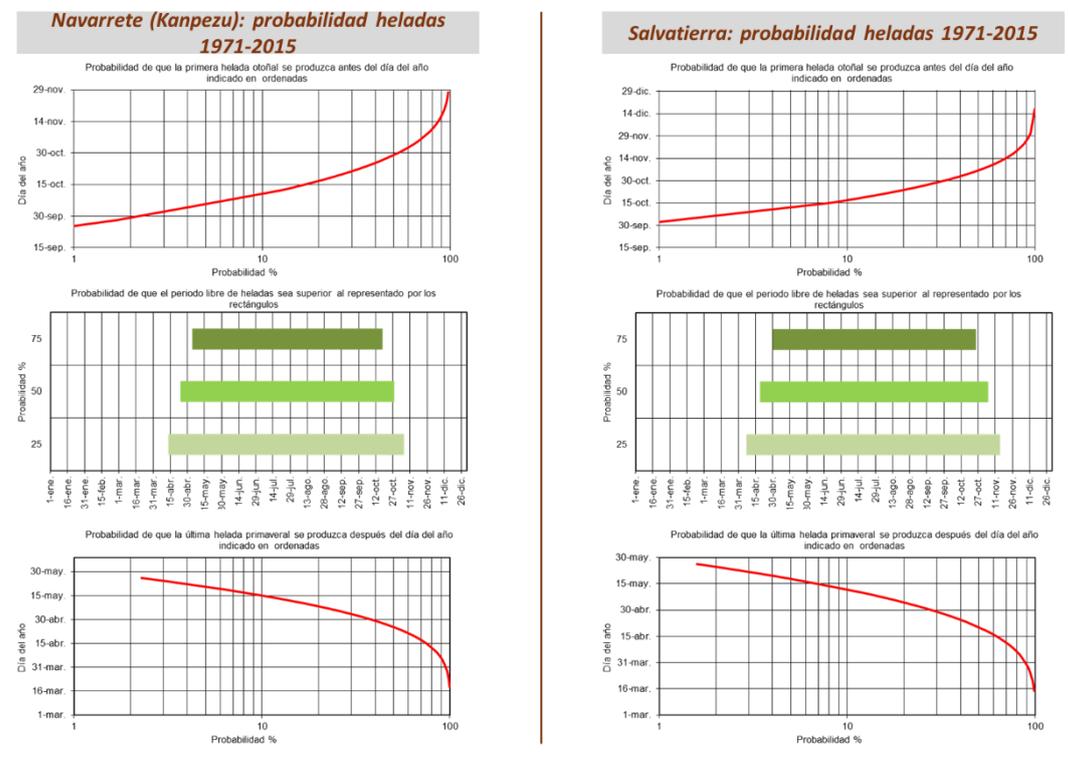


Figure 39 : Probabilité de gelée 1971-2015 : Navarrete et Salvatierra.

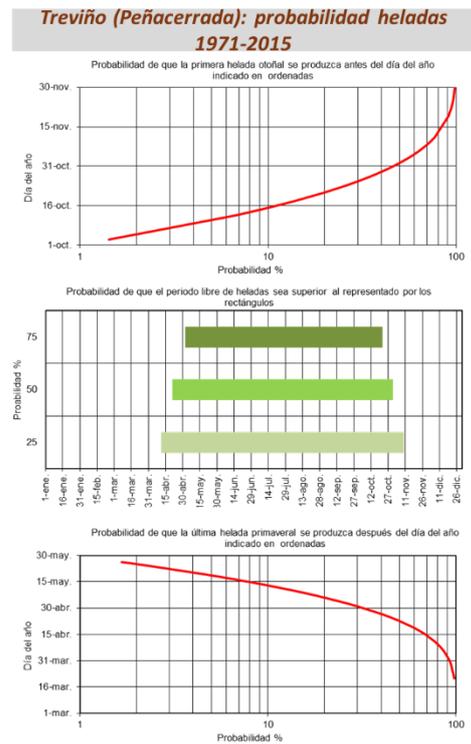
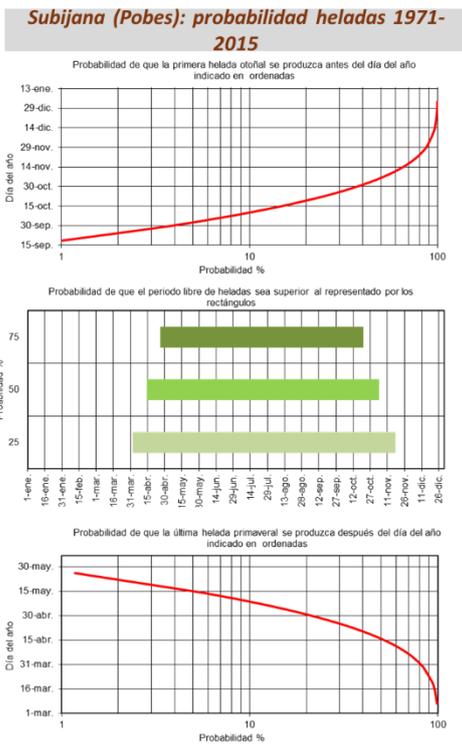


Figure 40 : Probabilité de gelées 1971-2015 : Subijana et Treviño.

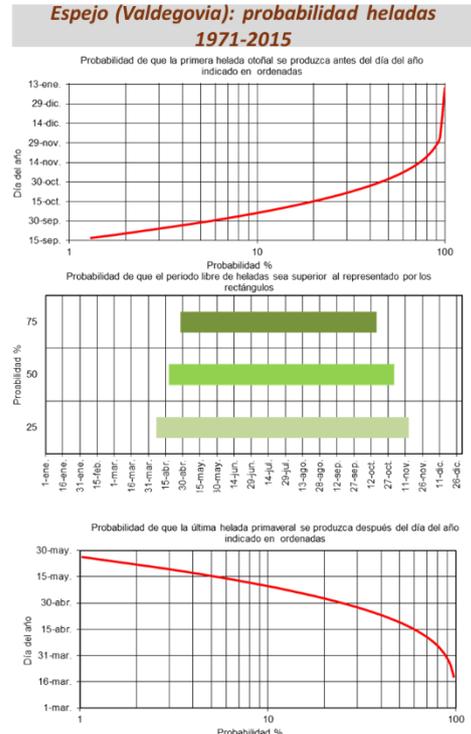
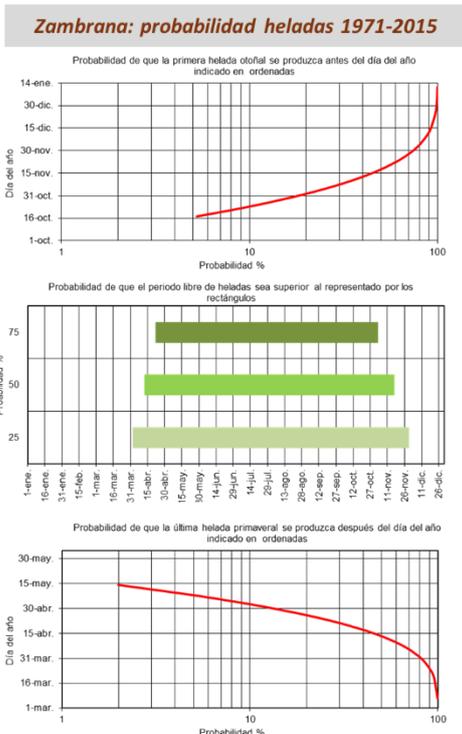


Figure 41 : Probabilité de gelée 1971-2015 : Zambrana et Espejo.

Paganos (Laguardia): probabilidad heladas 1971-2015

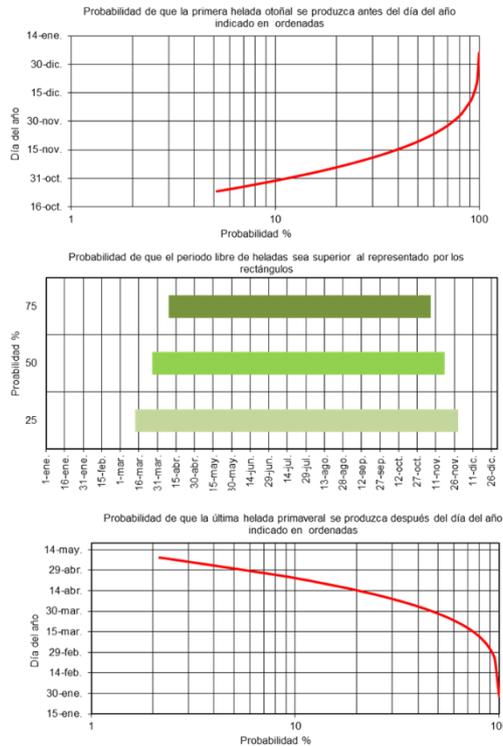


Figure 42 : Probabilité de gelée 1971-2015 : Páganos.

Gelées au Pays Basque entre mars et mai de 2004 à 2017

A partir des enregistrements des stations météorologiques nous avons calculé le temps passé en dessous du seuil de 0°C, par évènement et en le cumulant sur l'ensemble de la période 2004-2017 pour les mois de mars, avril et mai (Figure 43, Figure 44 et Figure 45).

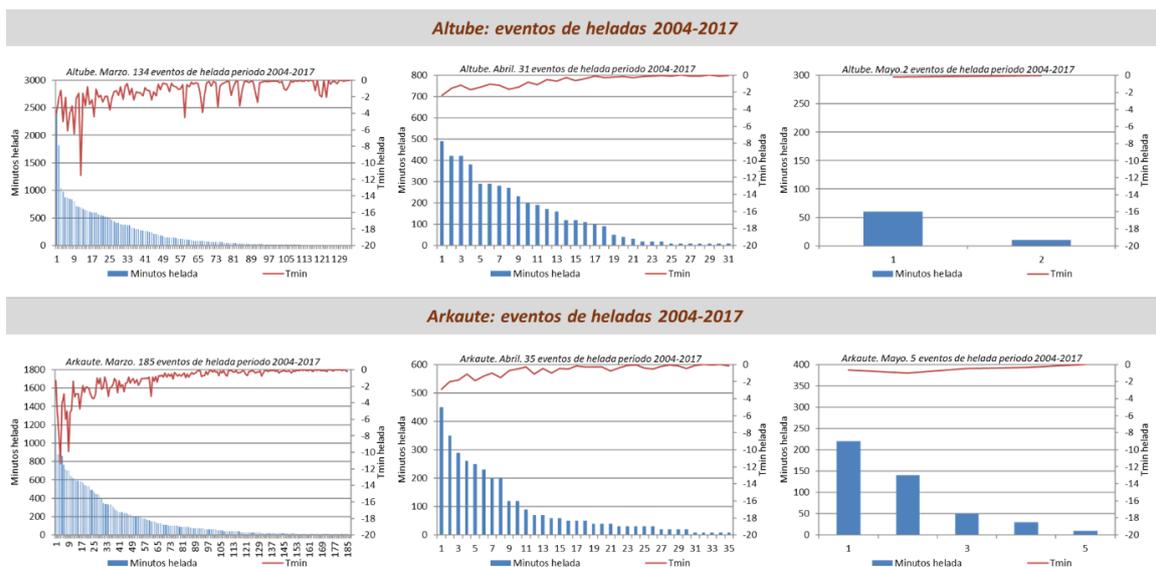


Figure 43 : Gels 2004-2017 : Altube et Arkaute.

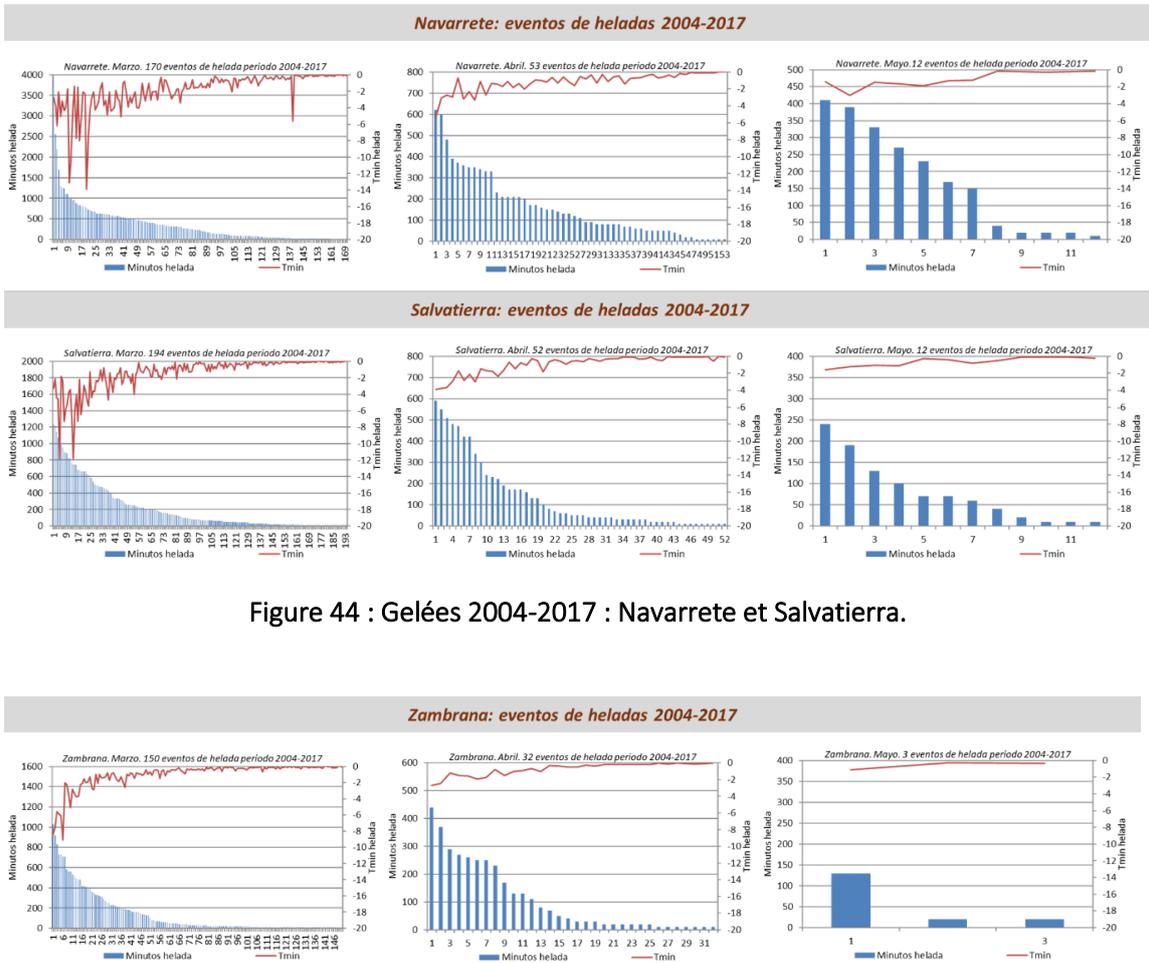


Figure 44 : Gelées 2004-2017 : Navarre et Salvatierra.

Figure 45 : Gel 2004-2017 : Zambrana.

C.2.4. Lleida. Étude sur le gel dans la région

Peu d'études ont été publiées sur l'incidence du gel en Catalogne et la probabilité de son apparition dans les différentes régions de production.¹² Dans la vallée de l'Ebre, il existe une étude sur l'incidence du gel entre 1981 et 2010 le long du bassin moyen de l'Ebre, y compris la Rioja, la Navarre, l'Aragon et la Catalogne.

¹³ Il existe également une étude sur les caractéristiques des gelées dans la moyenne vallée de l'Ebre, principalement dans la région d'Aragon, qui peut être étendue à la région fruitière de Lleida dans la mesure où les conditions géographiques sont semblables. Les principales conclusions de l'étude indiquent que les gelées les plus fréquentes sont celles causées par le gel de rayonnement, les plus dommageables étant celles qui ont une origine combinée d'advection

¹² Laviña, R. (2013). Le gel dans la région de la vallée de l'Ebre et son influence sur les cultures. Mémoire de maîtrise. Univ. Zaragoza.

¹³ Hernández, M. L. (2017). Typologie, genèse et développement du gel dans la moyenne vallée de l'Ebre. Geographicalia, (31), 95-114. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1994311771

d'air froid et de stabilisation ultérieure de cette masse d'air dans laquelle le rayonnement nocturne renforce le refroidissement.

Une étude de l'évolution dans le temps de la probabilité de gelées printanières dans la zone fruitière de Lleida a montré que la probabilité d'atteindre $-5,5^{\circ}\text{C}$ aux stations de Gimennells et de Mollerussa (comme en 2022) serait inférieure à 1 % (Figure 46).

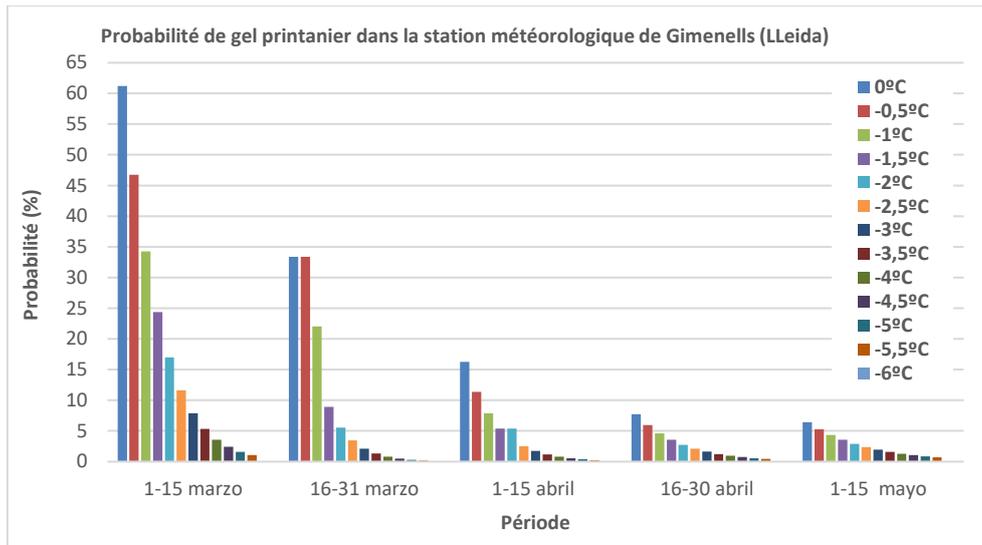


Figure 46 : Probabilité de gel à la station météorologique de Gimennells, située dans la zone fruitière de Lleida.

D. Principes du gel

Le gel survient lorsque le bilan énergétique entre le rayonnement solaire reçu et emmagasiné pendant la journée, d'une part, et le rayonnement thermique du sol et des plantes vers l'espace pendant la nuit, d'autre part, est suffisamment négatif pour que les températures nocturnes tombent pendant quelques dizaines de minutes en dessous des seuils de sensibilité des plantes, qui se situent généralement aux alentours de -2°C .

Le phénomène physique du gel est plus susceptible de se produire après le début de la croissance de la végétation et pendant les périodes où l'air polaire froid descend sur les zones continentales plutôt que sur l'océan, où la masse d'air perd sa transparence au rayonnement infrarouge à mesure qu'elle s'humidifie.

Le réchauffement climatique entraîne une croissance plus précoce de la végétation, ce qui augmente la probabilité de se trouver sur la trajectoire d'une dépression polaire continentale, plus fréquente en avril depuis 2017.

Bien qu'il s'agisse en fait d'un mélange de différentes situations de gel, il convient de rappeler les différents types de gel en présentant le gel par rayonnement, le gel par advection et le gel par évaporation, sachant que sur le terrain, le premier est généralement appelé gelée blanche, le deuxième gelée noire et le troisième n'est pas nommé. Cette troisième gelée surprend les agriculteurs car elle se produit généralement à l'aube, lorsque les températures minimales augmentent et diminuent juste avant le lever du soleil.

D.1. Gels par rayonnement

C'est la cause principale de la plupart des dégâts importants observés au printemps, en automne et, plus rarement, en hiver, lorsque les températures descendent en dessous de -15°C et que les troncs sont endommagés.

Comme son nom l'indique, la baisse de température est le résultat d'une perte de chaleur par le processus de radiation. Rappelons que tous les corps émettent en permanence des paquets d'énergie dans toutes les directions de l'espace. La longueur d'onde de l'émission est fonction de leur température. Le Soleil, à près de 5600°C , émet dans le visible (0,3 à 0,7 micromètre) et le proche infrarouge (0,7 à 3 micromètres). La Terre (15°C en moyenne) émet dans l'infrarouge à environ 10 micromètres. On supposera que tous les corps peuvent émettre le maximum théorique, qui est proportionnel à la température absolue de surface (en ° Kelvin) de ce corps à la puissance 4.

En même temps, la surface de tout objet reçoit et absorbe l'énergie radiative émise par les corps environnants dans son "champ de vision". Par temps clair, le sol est chauffé par les rayons du soleil, tant qu'il n'y a pas de nuages qui s'y opposent. ²²Au cours de la journée, la puissance des rayons solaires directs peut varier, atteignant entre 500 et 800 Watts/m² vers midi, alors que la Terre perd entre 150 (en fin de nuit) et 300 Watts/m² (à midi), 24 heures sur 24. À partir du 21 mars, le jour est plus long que la nuit.

La vapeur d'eau est un gaz transparent au rayonnement visible et infrarouge. Cependant, dès que les gouttelettes atteignent une taille de 10 microns, l'eau liquide absorbe le rayonnement infrarouge, qu'elle piège et réémet en grande partie. Les cristaux de glace sont également des absorbeurs.

Examinons les conditions spécifiques qui sont propices ou nécessaires pour qu'un tel événement se produise :

An-Gel Sudoe

- une masse d'air froid et sec domine la région dans toute l'épaisseur de l'atmosphère. Le ciel reste dégagé toute la nuit ; l'absence de nuages (donc l'absence de piège à rayonnement thermique dans l'infrarouge) entraîne une perte de chaleur du sol et de tous les végétaux vers l'espace.

- Ces pertes sont estimées à environ 180 W/m^2 en début de nuit et à près de 100 W/m^2 en fin de nuit, lorsque la température est plus basse. ²Parallèlement, l'atmosphère envoie un flux de rayonnement d'environ 30 à 50 W/m^2 vers la surface terrestre, en fonction de la température moyenne de la masse d'air qui survole une région.
- Au printemps, par exemple, lorsque l'air aux alentours de 5000 m est à -15°C , il n'y a presque pas de risque de gel si la température a été supérieure à 18°C au cours de la journée précédente. En revanche, lorsque de l'air plus froid (gouttes froides sans nuages) stagne ou circule sur une région et que la température vers 5000 m est proche de -25°C , le risque de gel sera élevé même si l'après-midi a été très ensoleillé. Il faut noter que si, durant la journée, la convection permet au vent de circuler au niveau du sol, durant la nuit, elle augmente la viscosité de l'air qui se refroidit au niveau du sol, ce qui atténue puis arrête le vent, sauf sur les reliefs.
- La durée de la nuit est suffisamment longue pour que la baisse de température, causée par la perte de chaleur par rayonnement, se poursuive en dessous du seuil de sensibilité des plantes.
- L'air des basses couches de l'atmosphère est suffisamment sec pour que le brouillard ne se forme pas avant que les températures ne descendent en dessous du point de congélation. En fait, lorsque le brouillard se forme, les grosses gouttelettes d'eau interceptent la majeure partie du rayonnement thermique infrarouge provenant du sol et en réfléchissent la quasi-totalité, ce qui limite la baisse de température nocturne à quelques degrés.
- Sous un ciel dégagé, dans une masse d'air froid et sec, les températures peuvent chuter de plus de vingt degrés, avec une baisse horaire maximale en début de soirée, lorsque le vent se calme.
- Il n'y a pas de vent pour brasser et mélanger l'air, qui se refroidit au contact des plantes et du sol plus frais, avec l'air situé à quelques mètres ou dizaines de mètres au-dessus, qui garde encore la mémoire de la température positive de la veille. Cette mémoire de l'air plus chaud, qui ne s'est pas encore refroidi parce qu'il circule loin au-dessus du sol, est appelée "inversion".
- En effet, dans cette situation nocturne, la température augmente d'abord de plusieurs degrés avec l'altitude avant de recommencer à baisser en moyenne de -2° par 1000m . Rappelons que la densité de l'air augmente lorsque sa température diminue. Ainsi, par convection naturelle, l'air froid stagne et glisse sur le sol, ce qui explique, entre autres, le caractère particulièrement froid des zones basses.

Et, dans une moindre mesure :

- La chaleur stockée dans le sol est insuffisante pour compenser la perte de chaleur par rayonnement. ²La remontée thermique du sol superficiel est estimée à un maximum de 80 W/m^2 dans le cas d'un sol nu, bien compacté et humide. Dès que le sol s'assèche, il devient moins conducteur car l'air qu'il contient est très isolant.
- L'herbe, le paillis de paille ou le sol fraîchement travaillé peuvent réduire ce transfert de chaleur du sol à moins de 20 W/m^2 .

- Une haie ou une forêt empêche l'air froid de s'échapper vers le bas. Une prairie ou une parcelle de céréales, ou une forêt de pins juste au-dessus de la parcelle, est une véritable "usine" à air froid, qui glissera vers la parcelle sensible pendant la nuit.
- Une haie de grands arbres crée un écran anti-radiation qui réduit le refroidissement au-dessus d'environ 1,5 fois la hauteur des arbres. Dans le cas des pins de bruyère, l'air froid produit par les aiguilles semble être plus important que la protection contre le rayonnement et il est préférable de les éloigner du bord des parcelles. De plus, ces pins consomment plus rapidement l'eau du sol au printemps, ce qui les rend moins thermos conducteurs et donc favorisant le risque gel des cultures voisines.

D.2. Gels d'advection

Dans de nombreuses régions, ce type de gel est connu sous le nom de "gelée noire", souvent pour des raisons très différentes qui ne peuvent être comprises que par l'expérience locale, et sans qu'il existe d'explication physique précise.

Le terme advection désigne le "déplacement horizontal d'une masse d'air" (Petit Robert). Dans notre cas, il faut ajouter qu'il s'agit d'air froid dont la température moyenne dans les couches inférieures est inférieure au seuil de résistance des plantes sensibles.

Dans le Sud-Ouest de l'Europe, les gelées d'advection correspondent à une invasion d'air du nord au nord-est, à température négative, quelle que soit la couverture du ciel ou l'humidité de l'air. Dans ce cas, l'air froid se réchauffe progressivement du nord au sud de l'Europe, emportant avec lui une partie de la chaleur stockée dans le sol. En revanche, si le sol est recouvert de neige, le flux de conduction est négligeable et la vague de froid se propage uniformément sur la France en direction de la péninsule ibérique. Seules les zones bordant de grandes étendues d'eau non gelées, et à condition d'être en aval de ce flux, ont quelques chances d'être légèrement plus chaudes ou de connaître la formation de brouillards givrants ou de nuages bas avec de la neige, qui fournissent un peu d'énergie lorsque la vapeur d'eau se condense ou gèle. C'est généralement le cas sur les îles et les côtes françaises bien exposées, comme la Bretagne ou la Corse.

Ce type de gel peut survenir à tout moment de la journée, car il s'agit de l'arrivée d'une masse d'air froid ayant une température inférieure aux seuils de sensibilité des plantes. Il est plus fréquent en hiver et dans l'est de l'Europe.

En apportant de l'air sec, il crée souvent des conditions propices au gel par rayonnement, ce qui augmente les dégâts (février 1956, janvier 1985). Parfois, lorsque la partie supérieure de la parcelle gèle alors que la partie inférieure reste plus chaude, les producteurs imaginent que c'est le vent froid qui a causé les dégâts en altitude. Les mesures récentes ne confirment pas cette interprétation, mais suggèrent plutôt l'impact d'un assèchement plus rapide du sol dans les parties supérieures des parcelles, qui sont ventées pendant la journée, alors que les parties inférieures restent saturées d'eau.

D.3. Gels par évaporation

Ce type de gel se caractérise par la surprise de voir les températures minimales fluctuer rapidement, parfois de plus de 2°C par heure, sans qu'il y ait de forts mouvements d'air ou de changements dans le ciel généralement dégagé. Ce phénomène dramatique se produit généralement à l'aube, mais peut se produire à tout autre moment lorsque les températures

An-Gel Sudoe

approchent des seuils de sensibilité et qu'un air particulièrement sec arrive sur une zone où les plantes sont humides.

Cette particularité de la très faible humidité de l'air est déterminante pour expliquer et prévoir ce type de gel. En effet, comme son nom l'indique, le froid nécessaire au gel est produit par l'évaporation de l'eau qui s'est déjà condensée ou gelée sur ou à proximité des cellules végétales sensibles. Rappelons que l'air contient de l'eau sous forme de vapeur et que cette masse d'eau varie en fonction de la température et de l'origine de l'air. Dans des conditions anticycloniques, avec une pression atmosphérique supérieure à 1015 hPa, l'air froid et sec "tombe" sur nous et s'humidifie, par exemple, au contact des surfaces humides et des masses nuageuses qu'il dissipe.

Prenons le cas d'un bon après-midi anticyclonique avec un flux de nord-est dans les basses couches, avec une humidité ne dépassant pas 35% et une température maximale de 16°C. Après le coucher du soleil, les phénomènes de convection naturelle responsables des quelques nuages de l'après-midi, parfois accompagnés d'averses, disparaissent du ciel clair ; le flux radiatif (voir ci-dessus) fait chuter rapidement la température au niveau du sol.

L'absence de vent et de mélange turbulent provoque une stratification de l'air froid, ce qui a pour effet de saturer les couches les plus froides en vapeur d'eau, principalement au niveau du sol et au sommet des feuilles ou des jeunes pousses. La vapeur qui ne peut plus être contenue dans cet air froid est forcée de se condenser sur les surfaces les plus froides : brins d'herbe, feuilles, brindilles, pousses, etc.

En se condensant, cette rosée dégage de la chaleur (600 calories/gr) qui augmente légèrement la température moyenne juste au-dessus, souvent de quelques dixièmes de degrés, parfois plus.

De nos jours, l'humidité de l'air est mesurée par des capteurs électroniques précis, ce qui permet de déterminer à un moment et à un endroit donnés la température sèche et la température dite humide, et donc la différence sec/humide, qui varie sur 24 heures, avec un maximum à midi et un minimum à l'aube. Lorsque cette différence est nulle et qu'il n'y a pas de vent, la rosée se condense ou le brouillard se forme. Les années précédentes, nous mesurons la température humide à l'aide de deux thermomètres, dont l'un avait son réservoir entouré d'une chaussette imbibée d'eau à température ambiante.

En cas de risque de gel, par exemple lors d'une dépression froide du nord au nord-est, la différence entre le sec et l'humide peut être de plus de deux ou trois degrés pendant la nuit et de plus d'un degré à l'aube. Cette différence reflète la sécheresse relative de l'air ambiant et, en fin de compte, le risque de gel par évaporation.

Les gelées par évaporation se produisent lorsque les plantes sensibles sont recouvertes de rosée ou d'eau après une averse ou un arrosage interrompu, et lorsque la température ambiante avoisine 0 à -2°C. Si, dans ces conditions, l'air est légèrement agité et que de l'air plus sec entre en contact avec des plantes humides, une partie de l'eau se transforme en vapeur et humidifie l'air qui manque d'eau.

Cette transformation de liquide en vapeur utilise de la chaleur, dont la majeure partie est extraite de l'eau liquide et du support sur lequel elle repose. Instantanément, chaque gramme d'eau qui s'évapore consomme 600 calories, ce qui provoque une baisse de la température de surface du support égale ou légèrement supérieure à celle relevée sur les thermomètres secs et humides. En quelques secondes, les cellules végétales supportant l'eau qui s'évapore peuvent descendre à une température inférieure au seuil d'endommagement par le gel. Même si la condensation se produit à nouveau quelques minutes plus tard, entraînant une remontée des températures, il est souvent trop tard, car il est confirmé qu'une plante humide ne peut pas survivre plus de quelques

minutes en dessous du seuil de sensibilité. Ce phénomène peut se produire naturellement lors de descentes d'air froid et sec juste précédées d'une traine active de nord-ouest, qui favorise la formation d'averses en fin de soirée. En première partie de nuit, des vents trop calmes ou des rideaux d'arbres empêchent le dessèchement des plantes, et lorsqu'il y a un léger brassage de l'air, parfois provoqué par l'arrivée d'air plus froid dans une dépression ou une vallée, le phénomène de gel évaporatif se produit. Il a également tendance à se produire à l'aube, ce qui est difficile à expliquer si ce n'est en invoquant la perturbation causée par le flux de rayonnement solaire, qui pourrait favoriser les transferts convectifs d'air qui mettent en contact de l'air plus sec avec la couche limite des plantes sensibles et humides. Une autre explication serait que c'est le moment où la période de refroidissement nocturne est la plus longue. Enfin, c'est le principal danger d'un démarrage trop tardif de la lutte active, soit par pulvérisation aérienne, soit par ventilation (voir les chapitres suivants sur la lutte active).

D.4. Mais la réalité est toujours plus complexe...

Si ces trois types de gel peuvent être identifiés et expliqués objectivement, dans la réalité, ils peuvent se produire simultanément ou successivement au cours d'une même nuit, ce qui rend difficile leur analyse et leur interprétation sur le moment.

Cependant, il est très utile de bien identifier ces trois principes et d'étudier les caractéristiques des fortes gelées qui se sont produites dans votre secteur par le passé, voire de les enregistrer dès maintenant, afin de mieux anticiper la nature du risque de gel et d'adapter ainsi la production en utilisant les systèmes de contrôle les plus appropriés.

Par définition, l'adjectif noire ou blanche signifie simplement qu'il y a ou pas du givre au ras du sol. Ce résultat est donc indépendant du type de gel décrit dans cette brochure. Il reflète uniquement la présence d'une humidité suffisante dans l'air pour avoir permis la formation d'une rosée qui, lorsque les températures sont devenues négatives, s'est transformée en givre. La gelée blanche est principalement observée lors d'une gelée de rayonnement dans une masse d'air assez humide où la différence sec/humide sera proche de 0,5 à 0,1°C à l'aube.

Étant donné que le givre ne se forme généralement pas dans le cas des gelées d'advection et que le givre ne se forme presque jamais dans le cas des gelées d'évaporation, ces deux types de gelées sont appelés gelées noires.

E. Systèmes de défense contre le gel

E.1. Protection passive contre le gel. Aspects généraux

Les méthodes de lutte passive contre le gel sont les systèmes, activités et pratiques que l'on pourrait également qualifier de "préventifs" et qui sont appliqués avant que le gel ne se produise afin d'essayer d'en minimiser les effets s'il se produit.

Cette section comprend les actions préalables à la plantation des cultures, telles que l'étude de l'adéquation du site et la sélection des espèces et variétés choisies, ou la modification du paysage et du microclimat pour agir sur la dynamique des courants d'air froid.

E.1.1. Choix du site, des espèces et des variétés

La prévention du gel commence au moment où le projet de plantation d'une espèce et d'une variété donnée est mis en œuvre. La présence et l'intensité des gelées de printemps sont l'un des facteurs les plus déterminants pour la viabilité économique de la production fruitière dans nos contrées.

En raison de toutes les implications économiques et de gestion d'une plantation d'arbres ou de vigne qui devrait avoir une durée de vie utile de plusieurs dizaines d'années, il est toujours nécessaire d'effectuer une étude préalable des risques de gel dans la zone où elle doit être plantée.

¹⁴Il existe actuellement des entreprises qui réalisent des études microclimatiques sur le risque de gel qui permettent de déterminer au niveau de l'exploitation, même pour les petites et moyennes exploitations, les zones où le risque de gel est plus ou moins élevé et les courants de drainage de l'air froid.

Ces études sont basées sur des données provenant de stations météorologiques (plus le réseau est grand et proche, plus l'estimation est précise), de la topographie du terrain (modèles numériques de terrain) et de modèles de mécanique des fluides. Pour valider le résultat et la définition des zones à risque, il est nécessaire d'enregistrer l'évolution des températures au sol sur une période suffisante et d'étudier la différence entre les zones. Cette étude du différentiel de température en fonction de la topographie avec des capteurs d'enregistrement de la température pourrait être une première approximation du comportement microclimatique de la parcelle.

D'une manière générale, les parties basses des zones en pente auront une température plus basse et un risque de gel plus élevé que celles situées dans la partie médiane de la pente. Pour les espèces de fruits à feuilles caduques, une orientation vers le sud entraînerait une floraison plus précoce au printemps, ce qui augmenterait le risque de dégâts en cas de gel. Les parcelles situées au-dessus d'obstacles (murs, brise-vent, végétation, bâtiments, etc.) qui entravent l'écoulement naturel de l'air froid seront normalement plus froides. La connaissance des schémas de température est également très utile pour localiser les obstacles qui gênent le drainage de l'air froid, pour placer des barrières qui peuvent dévier les courants d'air froid ou pour déterminer l'emplacement optimal des systèmes de lutte contre le gel en fonction du mouvement de l'air (figure 47).

¹⁴ The Climate Box. <https://theclimatebox.com/es/>

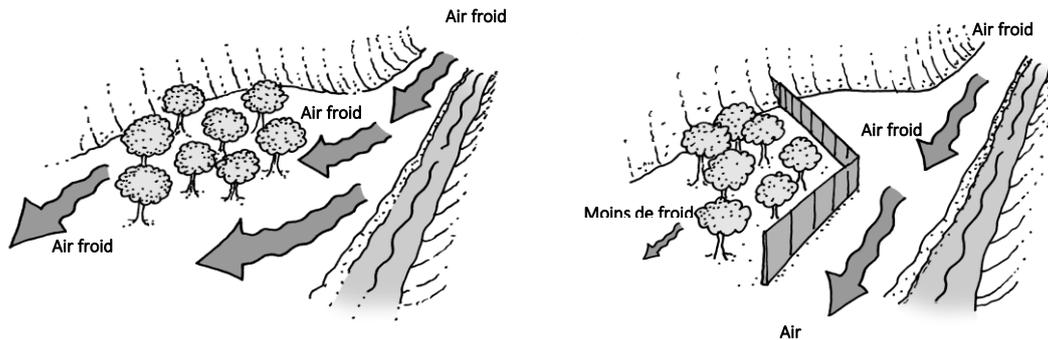


Figure : 47.-Correction des courants d'air froid à l'aide de clôtures pour protéger les plantations. Source : (Snyder et de Melo-Abreu, 2010).

D'autre part, avant la plantation et pour caractériser le site, la probabilité et le risque de dégâts dus au gel doivent être établis sur la base des données historiques de température. Plusieurs programmes de calcul sont également disponibles pour calculer ces aspects pour une zone donnée (Snyder et al., 2005). Certains de ces programmes incluent des études économiques et de retour sur investissement pour différents systèmes de protection en tenant compte des risques de perte de production dus au gel. ¹⁵Les feuilles de calcul correspondantes sont disponibles sur différents sites web.

Lors du choix du site, le type de sol a également un effet sur le gel. En particulier lorsqu'ils sont secs, les sols à texture sableuse transfèrent mieux la chaleur que les sols argileux et beaucoup mieux que les sols organiques, et seraient plus favorables pour éviter l'effet du gel.

E.1.2. Pratiques culturales

Après la plantation, un certain nombre d'activités et de pratiques ont un effet sur les dommages causés par le gel et pourraient réduire la nécessité de mesures de lutte active. Dans nos conditions, les principales méthodes de protection passive sont les suivantes :

■ Une bonne alimentation

Du point de vue du gel de printemps, une bonne nutrition des arbres la saison précédente, en les maintenant en végétation active le plus longtemps possible, retarderait le débourrement et la floraison et réduirait le risque de gel en retardant le cycle de la culture.

Certaines études ont montré qu'un excès d'azote peut nuire à la protection des cultures contre les basses températures (Scagel et al., 2010). Ce phénomène est attribué à l'augmentation de la croissance végétative et, par conséquent, à la sensibilité accrue des tissus au stress dû au gel.

■ Systèmes de formation et de taille

Les systèmes de formation avec de grands arbres peuvent être considérés comme un système de protection basé sur la possibilité qu'une partie de la culture, située dans les parties les plus hautes, puisse être sauvée en cas de gelées de rayonnement où la température la plus basse se

¹⁵ www.agroorbi.pt/livroagrometeorologia/Programas.html

trouve dans la zone la plus proche du sol. Il s'agit d'une pratique courante dans les régions où ce type de gel est fréquent.

Une taille tardive retarderait le débourrement et la floraison, tandis qu'une taille très précoce les avancerait et, par conséquent, augmenterait le risque de dégâts dus au gel. À cet égard, une expérience a été menée pour évaluer différentes dates de taille dans un vignoble de Samaniego dans la Rioja Alavesa dans le cadre du projet POCTEFA VITISAD (<https://www.vitisad.eu/?lang=es>) en collaboration avec Bodegas OSTATU en 2021. La taille a été effectuée en décembre, janvier, février, mars et avril et un retard dans le débourrement de 7 jours a été observé lors de la taille de mars et de 12 jours lors de la taille d'avril par rapport à la taille précédente. Pour la nouaison, le retard s'est poursuivi puisque, lors des tailles de mars et d'avril, elle a eu lieu respectivement 5 et 9 jours plus tard.¹⁶ Même à la véraison, le cycle de croissance a continué à être plus tardif, bien que les différences soient moins marquées. Les années suivantes, les mesures de qualité ont continué à être obtenues sur des raisins à la fin de la phase de maturation, car l'objectif du projet était de s'adapter au changement climatique et d'évaluer les pratiques qui permettraient d'allonger le cycle de la vigne afin d'éviter la maturation dans des périodes précoces très chaudes. Ainsi, il convient de noter qu'en 2021 et 2023, une légère baisse significative du pH a été obtenue lors de la taille en avril. Le projet An-Gel Sudoe permettra de poursuivre l'essai et d'effectuer de nouvelles mesures de phénologie qui nous aideront à connaître plus en détail le retard des stades initiaux, qui est une mesure de défense contre les gelées printanières. Il est intéressant de voir si les retards observés en 2021 se maintiennent ou si, en fonction de la saison, le nombre de jours de différence dans les premiers stades de la culture observés lors de la taille tardive peut être réduit ou augmenté.

En cas d'utilisation de systèmes de protection basés sur des systèmes d'arrosage ou de micro-aspersion, des systèmes de formation avec des structures de soutien et des branches pas trop longues réduiraient la rupture de ces branches dans les situations de forte production de glace.

▪ Gestion des sols

Du point de vue de la protection contre le gel, l'objectif des différentes pratiques serait que le sol stocke le plus possible l'énergie qui peut lui parvenir sous forme de rayonnement pendant la journée et qu'il ait la capacité maximale de la transmettre pendant la nuit pour amortir la baisse de température.

L'absence de labour et de compactage du sol améliore cette capacité de stockage et de transmission de la chaleur, car il y a moins d'air (qui transmet mal la chaleur) dans le profil du sol. De même, une situation où la teneur en eau du sol est à la capacité au champ et où il n'y a pas d'eau à la surface est la plus favorable au transfert de chaleur.

Le sol nu, sans couverture herbacée, augmente l'absorption du rayonnement et son transfert. Plus l'herbe est haute, plus la différence de température avec le sol nu est importante (jusqu'à 2°C avec 5 cm d'herbe) (Snyder et De Melo-Abreu, 2005).

¹⁶ Guide des pratiques viticoles et de l'adaptation au changement climatique dans la zone POCTEFA (Programme INTERREG V-A Espagne-France-Andorre) <https://www.vitisad.eu/wp-content/uploads/2022/05/guide-vitisad-es-v3-1.pdf>

E.1.3. France. Lutte passive sur le châtaignier

La protection commence par le choix du lieu de plantation en fonction du risque de gel (Union Interprofessionnelle de la châtaigne du Sud-Ouest, 2022). La sensibilité de la vigne au gel est similaire à celle du châtaignier et peut donc servir de référence. Les facteurs de risque sont donc les situations gélives, telles que les vallées, les bas de pente, notamment là où le froid ne peut s'évacuer, et les pentes exposées au sud-ouest avec des sols sableux propices à un débourrement précoce. Il est donc important d'utiliser les données météorologiques de la région avant de choisir un site (L'heureux, 2023).

L'ouvrage du Ctifl Protection des vergers contre les gelées printanières (Vaysse et Jourdain, 1992) peut servir de modèle de référence pour l'aménagement en fonction de la situation géo-climatique, du choix des espèces et variétés (voir section 2.1.1) ou de la conception de l'environnement du verger de châtaigniers.

A travers les bulletins techniques de Châtaigne Sud-Ouest, les producteurs ont accès à des informations sur les risques et les moyens de protéger les châtaigniers contre le gel. Les stratégies proposées aux producteurs sont les suivantes (Union Interprofessionnelle de la châtaigne du Sud-Ouest, 2024) :

1. Maintenir un couvert végétal très bas entre les rangs sur l'ensemble du verger plusieurs jours avant le risque de gel, en veillant à ne pas avoir un paillis constant qui pourrait avoir un effet isolant et limiter ainsi le rayonnement de la chaleur du sol vers le haut ;
2. Désherbage des rangs ;
3. Maintenir une épaisse couche de paillis au pied des jeunes arbres ;
4. Appliquer un badigeon sur le tronc, surtout sur les jeunes arbres de deux à quatre ans et sur les parcelles les plus exposées au gel. Les produits suivants sont disponibles : BNA pro (hydroxyde de calcium, dilué à 50%, pulvérisé sur le tronc, ou légèrement dilué comme chaulage), Calciblanco (hydroxyde de calcium + additif minéral, poudre diluée à 8%, appliquée au pinceau ou au pulvérisateur), Baïkal (kaolin, dilué à 5-8%) et Caliamu (carbonate de calcium, dilué à 6%), dont la résistance au lessivage est moins bien connue. Il est recommandé d'entretenir le blanchiment en cas de fortes pluies ;
5. La protection des jeunes plants par des tubes peut, dans une certaine mesure, limiter les risques de coups de soleil et de gel sur les troncs.

Ces éléments sont décrits dans la littérature, mais devront être validés au cours du projet.

E.1.4. Portugal

Au Portugal, les gelées, en particulier dans les régions intérieures du nord et du centre, causent souvent des dommages importants à des arbres fruitiers à feuilles caduques tels que les pommiers, les cerisiers et les amandiers. Les revenus des agriculteurs sont gravement affectés et la non-stabilisation de la production a également des conséquences pour les entreprises et les coopératives du secteur. En plus de réduire la production, le gel provoque des déformations et d'autres défauts dans les fruits, ce qui réduit leur valeur commerciale. Malgré le risque élevé de gel et l'importance économique et sociale de l'agriculture dans ces régions, la plupart des producteurs ne protègent pas activement leurs cultures contre le gel.

Ces dernières années, certaines pratiques culturales, notamment en termes de gestion du sol, telles que l'utilisation de couvertures végétales (spontanées ou semées) ont constitué une bonne pratique passive pour lutter contre le gel. Le fait de ne pas travailler le sol, surtout au printemps, contribue à augmenter le flux de chaleur dans le sol et, par conséquent, la température de surface pendant les nuits de gel. En ce qui concerne les méthodes passives, certains producteurs ont pratiqué une taille tardive pour retarder les premiers stades phénologiques, en particulier dans la viticulture.

En ce qui concerne les méthodes passives, les producteurs sont encore très peu conscients du type de méthodes qui peuvent être utilisées et de leurs avantages. Davantage de publicité et de démonstrations sont nécessaires pour sensibiliser les producteurs à l'adoption de méthodes passives de lutte contre le gel, qui peuvent être complétées par des méthodes actives dans des conditions de gel plus sévères.

Références

- Lheureux, F. 2023. La châtaigne. Monographie. Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris, France. 334p.
- Scagel, C. F., Regan, R. P., Hummel, R. et Bi, G. (2010). Cold Tolerance of Container-grown Green Ash Trees Is Influenced by Nitrogen Fertilizer Type and Rate. HortTechnology hortte, 20(2), 292-303. doi.org/10.21273/HORTTECH.20.2.292
- Snyder, R. L. ; De Melo-Abreu, J. P. 2005. Frost protection : fundamentals, practice and economics. Vol. I. Nations unies, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 223 p.
- Snyder, R. L., De Melo-Abreu, J. P., Matulich, S. 2005. Protection contre le gel : justification, pratique et économie. Vol. II. Nations unies, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 64 pages. <http://www.fao.org/docrep/008/y7231e/y7231e00.htm>
- Union Interprofessionnelle de la châtaigne du Sud-Ouest (2018). Bulletin d'information de l'Union interprofessionnelle. 13p.
- Union Interprofessionnelle de la châtaigne du Sud-Ouest (2022). Créer un verger de châtaigniers, éléments technico-économiques. 6p.
- Union Interprofessionnelle de la châtaigne du Sud-Ouest (2024). Bulletin technique châtaigne Sud-Ouest N°2. 9p.
- Vaysse, P. et J.M. Jourdain (1992). Protection des vergers contre les gelées printanières. Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris, France. 113p.

E.2. Protection active contre le gel

Les moyens de protection actifs sont ceux qui sont utilisés lorsque le gel se produit (ou est sur le point de se produire) afin de contrer ses effets.

Dans de nombreux cas, la capacité à prévoir les gelées est essentielle pour pouvoir les mettre en œuvre et les mettre en place suffisamment tôt pour qu'elles soient efficaces.

Le contrôle actif du gel repose sur l'application de plusieurs principes physiques différents :

- Fourniture de chaleur supplémentaire à la parcelle de production
- Exploitation de la chaleur latente libérée lors du processus de congélation de l'eau.
- Homogénéisation de l'air stratifié à différentes températures.

E.2.1. Systèmes basés sur l'approvisionnement en eau

Ces systèmes sont basés sur la libération de chaleur latente qui se produit lorsque l'eau passe de l'état liquide à l'état solide. Afin d'obtenir une chaleur suffisante pour lutter contre le gel, l'eau doit être fournie en quantité et à une fréquence suffisante pour maintenir une quantité de glace fondante sur les plantes et le sol, de sorte que la température reste supérieure à la température critique qui causerait des dommages aux cultures.

Ce sont les systèmes qui offrent une protection maximale dans les différentes conditions de gel, à condition que les conditions correctes soient respectées au niveau de la conception, de l'entretien et du fonctionnement. Il est très important de disposer d'une quantité d'eau suffisante pour couvrir toute la durée du gel, car lorsque le système est mis en marche, un arrêt du système pendant la période de gel causerait des dommages plus importants que si l'irrigation n'avait pas été mise en marche.

Pour le bon fonctionnement de tous ces systèmes basés sur un apport d'eau, en ce qui concerne le démarrage et l'arrêt, il est **essentiel de disposer de thermomètres à bulbe humide ou de psychromètres** qui indiquent la température du bulbe humide et pas seulement la température de l'air, afin de tenir compte de l'effet de l'évaporation éventuelle de l'eau au moment du démarrage du système.

Les systèmes d'application de l'eau sont décrits ci-dessous.

E.2.1.1. Pulvérisation sur les plantes

Les caractéristiques les plus courantes de ce système sont (Figure 48) :

- Protection jusqu'à -7°C si les débits et l'uniformité d'application sont optimaux.
- Intensité des précipitations : environ 4 mm/ha heure (40 000 l/ha et heure)
- Cadres de pulvérisation standard : 15 x 15 à 18 x 15 m.
- Pression de service : 3,5 - 4,5 bar



Figure 48 : Installation d'irrigation par aspersion dans des pêchers (à gauche). Modèles spécifiques d'arroseurs antigel en plastique (au centre) et en métal (à droite).

Les principaux avantages sont sa capacité à protéger contre différents types de gel, la facilité d'automatisation et l'impact relativement faible sur l'environnement et le milieu (au-delà de la consommation d'eau nécessaire à son fonctionnement). En outre, le système pourrait être utilisé dans d'autres activités telles que l'irrigation de rafraîchissement ou le "lavage" des arbres comme système de défense contre certains parasites.

Ses principales limites, outre la disponibilité de l'eau, sont l'accumulation possible d'eau dans le sol avec le risque d'asphyxie des racines si elle doit être utilisée plusieurs nuits consécutives, la rupture des branches due au poids de la glace et la nécessité d'un contrôle et d'un entretien très minutieux du système. De même, son utilisation au moment de la floraison des espèces d'arbres fruitiers (surtout pour les fruits à noyaux, et surtout pour les espèces difficiles à nouer, comme l'abricot, le prunier et le cerisier) peut provoquer un lavage du pollen et une chute considérable à la nouaison.

E.2.1.2. Micro-pulvérisation sur les plantes

Il fonctionne sur la même base que la pulvérisation conventionnelle, mais en réduisant le volume d'eau appliqué tout en maintenant le niveau d'efficacité autant que possible. Pour ce faire, on modifie le type d'émetteurs (débit et plage de débit plus faibles et taille des gouttelettes plus fine) et on applique l'eau en continu ou par impulsions très brèves. Ces dernières années, des micro-asperseurs ont été mis au point, qui permettent de localiser l'eau sur des rangées d'arbres ou même sur des arbres individuels, améliorant ainsi l'efficacité de la protection.

Les caractéristiques les plus courantes du système sont les suivantes

- Intensité des précipitations : 1,5- 3 mm/ha heure (15-30.000 L/ha et heure)
- Nécessite une filtration plus intensive que la pulvérisation conventionnelle
- En raison de leur faible diamètre, les tuyaux doivent toujours être démarrés à une température supérieure à 0°C afin d'éviter qu'ils ne gèlent. Le système doit être vidangé après chaque arrosage.

E.2.1.3. Micro-pulvérisation pulsée sur les plantes

L'objectif est de réduire la consommation d'eau en essayant de maintenir l'efficacité de la protection en utilisant des systèmes qui provoquent une pulsation dans l'application de l'eau (Figure 49).



Figure 49 : Installation d'un système de micro-pulvérisation pulsée. A gauche. A droite, deux modèles de micro-asperseurs avec système de pulsation.

Ils utilisent une pluviométrie d'environ 1 à 1,5 mm/ha à l'heure. Pour leur gestion, il faut suivre les mêmes instructions que pour le système de micro-irrigation conventionnel.

Ces systèmes à faible débit n'ont pas été testés dans toutes les régions d'Europe et pourraient ne pas apporter assez d'énergie dans le cas de fortes gelées à moins de -4 °C. Des essais sont en cours à l'IRTA et les résultats seront publiés à la fin d'AnGel.

E.2.1.4. Pulvérisation/micro-pulvérisation sous les arbres

Il s'agit de l'installation d'un système d'arrosage ou de micro-aspersion sous la frondaison des arbres. Dans ce cas, l'objectif est de maintenir la température du sol autour de 0°C afin d'augmenter indirectement la température ambiante. La défense potentielle contre le gel serait moindre par rapport au système situé au-dessus des arbres, mais il présenterait d'autres avantages tels que la non-rupture des branches, le lavage du pollen chez certaines espèces ou la possibilité de l'utiliser en combinaison avec des couvertures ou des filets.

E.2.2. Systèmes basés sur le mouvement de l'air

Ces systèmes sont basés sur le déplacement des couches d'air qui présentent une stratification des températures lorsqu'il y a des conditions d'inversion thermique, de manière à ce que la température de l'air soit plus élevée dans les couches supérieures que dans les couches inférieures en contact avec les plantes. L'objectif du déplacement de l'air est de rompre la stratification des couches d'air et de ramener l'air plus chaud au-dessus des plantes à un niveau qui permet à la température de l'air entourant les plantes de s'élever et d'éviter le gel.

Les situations les plus favorables à leur réussite sont les zones planes et les plantations relativement grandes. Ils ne fonctionnent que dans des conditions de gel radiatif avec une **forte inversion thermique** et une couche d'inversion entre 5 et 25 m au-dessus des plantes. Un exemple de la distribution des températures en fonction de la hauteur, typique de ce type de gel, est illustré dans la Figure 50.

An-Gel Sudoe

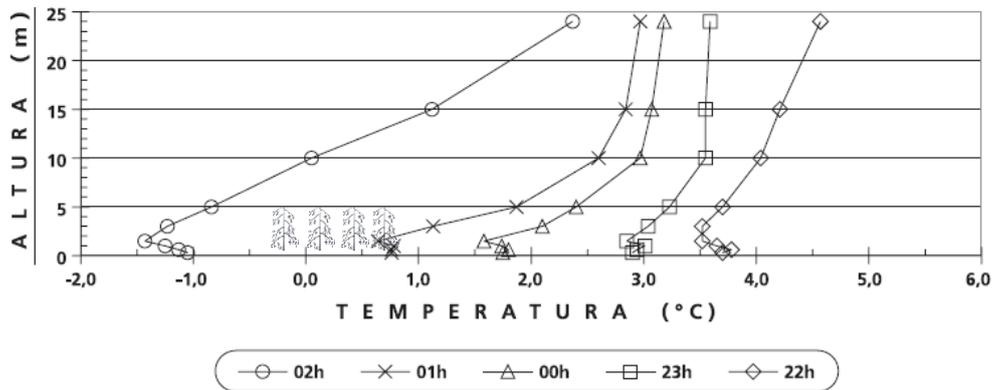


Figure 50 : Développement des conditions d'inversion thermique à différents moments de la nuit dans un verger de pommiers au Portugal. D'après Snyder et de Melo-Abreu, 2005, 2010.

Le bénéfice réel dépend de la force de l'inversion thermique qui est la différence de température en hauteur (par exemple à 15 m) et la température à hauteur de la plante (1,5 m). Selon différents auteurs, l'augmentation de la température serait comprise entre 30 % et 50 % de cette différence de température (Hu et al., 2018). Il faut également noter que l'effet sur la température diminue significativement avec la distance de la tour (Reese & Gerber, 1969).

Il existe actuellement plusieurs modèles de tours de ventilation fixes de différentes hauteurs et dimensions de pales, ainsi que des unités mobiles de différentes puissances et dimensions.

En ce qui concerne le système de propulsion, il est possible d'utiliser des moteurs diesel statiques indépendants de différentes puissances en fonction de la taille des lames. Il existe également des modèles équipés de moteurs électriques ou alimentés par la prise de force du tracteur.

Ventilateurs. Tours fixes

Les ventilateurs fixes sont constitués d'une tour en acier surmontée d'un ventilateur rotatif composé de 2 à 5 pales d'un diamètre de 3 à 6 m, légèrement inclinées vers le bas (6-7 °C) pour améliorer leur efficacité. Ils sont entraînés par un moteur, généralement un moteur diesel de grande puissance, situé à la base de la tour et une base en béton doit être installée pour les fixer au sol.

La hauteur au sol est généralement de 10 à 11 m, et l'hélice doit effectuer un tour de 360° en 3 à 5 minutes (Figure 51).



Figure 51 : Verger de pêchers protégé par une tour de ventilation fixe Orchard Rite.

Dans le commerce, on affirme qu'ils peuvent couvrir entre 3 et 7 ha en fonction de leur conception et de leur puissance. Par conséquent, dans les grandes zones, il convient d'en installer plusieurs de manière que leur action se chevauche afin d'obtenir une plus grande efficacité.

Les ventilateurs doivent être mis en marche au plus tard lorsque la température de l'air atteint 0 °C, mais si les plantes sont humides, il convient de le faire plus tôt afin de ne pas générer de gel par évaporation dans le but de les sécher avant que le gèle se forme sur les fruits. Les ventilateurs doivent fonctionner lorsque la température critique des dommages est atteinte.

À des vitesses de vent supérieures à 2,5 m/s (8 km/h), le système n'apporte aucune amélioration et peut même endommager l'hélice. Il ne doit donc pas être utilisé dans ces conditions.

Le bruit et les vibrations qu'ils provoquent constituent un problème majeur qui peut nuire considérablement à leur utilisation dans les zones proches des centres habités. Avec les modèles à plus de 2 pales, l'effet du bruit est moindre.

Ventilateurs portables

Ils sont basés sur le même principe que les tours fixes, mais leur puissance est moindre et ils couvrent une zone plus petite. Ils peuvent être déplacés entre les parcelles ou stockés lorsqu'ils ne sont pas utilisés, ce qui leur confère une plus grande polyvalence et un moindre impact sur le paysage. Il n'est pas nécessaire d'installer des dalles de béton au sol pour assurer leur stabilité.

Il existe plusieurs fabricants et modèles avec des puissances, des hauteurs et des revêtements différents (Figure 52). Ils sont alimentés par des moteurs à combustion ou électriques.



Figure 52 : Différents modèles de ventilateurs mobiles.

Ils présentent également les mêmes limites que les systèmes statiques.

Systèmes SIS (Selective Inverted Selective Sump)

Il s'agit d'une méthode développée en Uruguay qui consiste en un ventilateur positionné horizontalement qui prend l'air le plus froid des parties inférieures et le souffle verticalement hors de la zone d'influence des plantes (Figure 53).

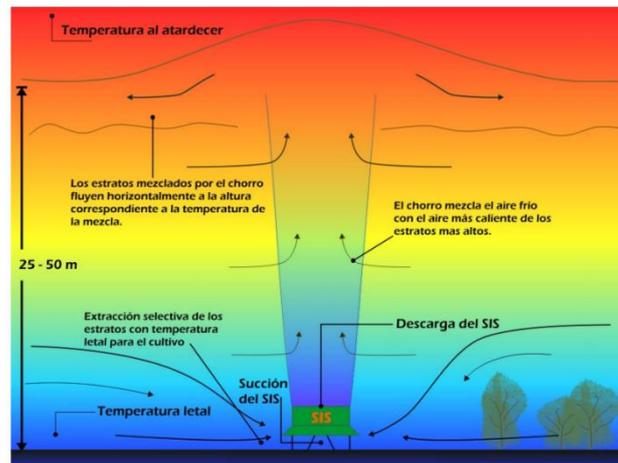


Figure 53 : Fonctionnement théorique du système SIS. Source : Frost Protection.com

Il ne fonctionnerait qu'en cas de gelées de rayonnement et principalement sur les parcelles situées dans la partie inférieure des topographies sous forme de petites vallées ou de bassins où l'air froid redescendrait naturellement et où le système compenserait cette circulation.

L'objectif est de protéger contre le gel avec un investissement et une consommation d'énergie moindres. Sur le plan commercial, il existe deux types de modèles (15 et 50 CV), bien qu'au fil du temps, des versions très différentes aient été réalisées en termes de diamètres et de puissances (Figure 54).



Figure 54 : Modèles de systèmes SIS. A gauche : Uruguay (Source : <http://www.produccionnacional.com.uy/frost-protection/>). A droite : Espagne (Source : SATGarden Frost Control).

Les résultats publiés jusqu'à présent indiquent une faible efficacité du système (Hu et al., 2015) et il a été abandonné en Moyenne-Garonne après des résultats insuffisants.

E.2.3. Systèmes basés sur l'apport de chaleur

L'objectif de ces systèmes est de fournir suffisamment de chaleur pour compenser les pertes d'énergie des cultures en cas de gel et de veiller à ce que les températures ne descendent pas en dessous des seuils de sensibilité des cultures à protéger.

Il s'agit du moyen le plus intuitif et le plus primaire de lutte contre le gel. Traditionnellement, il consiste à brûler divers matériaux pour produire de la chaleur (déchets végétaux, paille, combustibles fossiles, huiles, pneus, etc.), souvent sous la forme d'un feu ouvert. Aujourd'hui, on utilise des réchauds métalliques plus ou moins grands, plus ou moins volumineux et plus ou moins efficaces, ou des pots de paraffine.

Le système est plus efficace dans certaines situations :

- En cas de gelées de rayonnement avec une forte inversion thermique
- Plus il y a de points de chaleur et plus ils sont dispersés dans le champ. Si l'inversion thermique est faible et que les sources de chaleur ponctuelles sont trop grandes et trop chaudes, l'air chauffé monte trop haut et l'énergie est perdue dans l'espace au-dessus de la culture, ce qui réduit considérablement l'efficacité.
- Les systèmes les plus efficaces ont peu de flammes au-dessus de la cheminée et ne dégagent pas de fumée. La fumée n'est pas utile et pollue l'environnement.
- Lorsque les côtés de la parcelle sont renforcés par d'autres lignes de chauffe ou des haies brise-froid.

Il s'agit de systèmes dont le fonctionnement nécessite une forte consommation d'énergie, souvent fossile.

Bien que des efforts soient faits pour améliorer la situation dans ce domaine, la production de fumée peut constituer une nuisance pour les voisins et avoir un certain impact sur l'environnement.

E.2.3.1. Chauffeuses

C'est le système de chauffage le plus ancien et le plus traditionnel. Il est fabriqué en utilisant divers combustibles organiques (pellets, briquettes de bois, etc.) ou des combustibles fossiles tels que le gaz ou le fioul. Quelques modèles de chauffeuses sont présentés dans la Figure 55.

An-Gel Sudoe



Figure 55.-Modèles de chaufferettes pour différents combustibles : modèle à granulés Viti-Chauffe (A), modèle à briquettes de bois Wiesel (B) et modèle au gazole (C).

Ces systèmes sont très coûteux en termes d'investissement initial et en raison des besoins élevés en main-d'œuvre pour leur distribution sur le terrain, leur allumage et leur entretien au moment du gel, en plus du coût du combustible utilisé.

Le domaine d'application le plus approprié est celui des petites exploitations où la fréquence des gelées est faible et la production de valeur commerciale élevée, et où aucune autre méthode de contrôle ne peut être utilisée.

E.2.3.2. Pots de paraffine (bougies)

Les bougies ou pots de paraffine sont constitués d'un volume de paraffine et d'une mèche pour entretenir le feu. Elles ont une capacité de 5,5 à 6,5 L, ce qui leur confère une durée de vie de 10 à 12 heures (Figure 56). Le niveau de protection obtenu dépend du nombre de bidons utilisés, qui se situe entre 150 et 450 par hectare.¹⁷¹⁸ Selon les données de l'entreprise, l'augmentation de la température serait comprise entre 2 et 6°C, bien que lors d'une expérience de terrain en conditions réelles réalisée par l'entreprise elle-même, l'augmentation de la température (avec une densité de 333 bougies/ha) a été au maximum de 2,6°C avec une moyenne de 2,2°C.



Figure 56 : Utilisation de bidons de paraffine pour la protection des arbres fruitiers et deux modèles commerciaux : Firefrost (au centre) et Stop-gel (à droite).

Ils présentent les mêmes contraintes d'application que les réchauds, ainsi que des avantages et des inconvénients similaires : Le système nécessite une main d'œuvre importante pour distribuer,

¹⁷FIREFROST - Informations non contraignantes communiquées par l'entreprise: <https://firefrost.es/productos/>

¹⁸ Rapport final du projet ECOVELAS. <https://www.gopasociafruit.com/wp-content/uploads/2020/09/MEMORIA-FINAL-ECOVELAS.pdf>

allumer et éteindre les bidons. Son coût est élevé en cas d'utilisation prolongée. En outre, la gestion des stocks est compliquée en raison de l'incertitude des besoins spécifiques en bidons qu'aura une exploitation, ce qui oblige à investir un capital important à l'avance pour assurer leur disponibilité pendant les périodes critiques.

Plus que l'augmentation de température de la masse d'air entourant les végétaux, le chauffage avec des chaufferettes ou des bougies assure surtout un réchauffement des parties sensibles au gel des végétaux par rayonnement. En effet l'air réchauffé au contact du système monte quasiment à la verticale et une grande partie de l'énergie produite est perdue au-dessus de la canopée sans avantage pour les végétaux. En revanche la tôle chauffée par la combustion rayonne sur une dizaine de mètres environ et c'est le cas principalement pour les chaufferettes équipées d'une cheminée qui ont une surface d'émission de rayonnement supérieure aux bougies.

E.2.3.3. Chauffages mobiles

Il s'agit de systèmes de chauffage montés sur châssis qui sont tractés par des tracteurs dans la plantation pendant la période de gel. Ils génèrent de l'air chaud qui est soufflé perpendiculairement à la direction de déplacement du tracteur en utilisant du gaz propane ou des matériaux organiques (paille, bois, etc.) comme combustible (Figure 57).



Figure 57 : Différents modèles de chauffages mobiles. A gauche : Chauffage au propane. Au centre : système Frostbuster au propane. A droite : modèle Segué's Terreco pour les déchets végétaux.

Plusieurs modèles ayant des capacités énergétiques différentes sont disponibles sur le marché. Les machines doivent se déplacer dans les rangées d'arbres avec une séparation entre les passages dépendant des modèles (entre 25 et 100 m) en suivant un itinéraire qui leur permet de revenir au même endroit (ou à un endroit proche) dans un intervalle de temps maximum de 8 à 10 minutes.

Le passage des machines en fonctionnement entraîne des augmentations temporaires de la température aux points proches du chauffage, bien que l'augmentation de la température moyenne de la plantation ne soit pas significative. Ces augmentations temporaires de température produites par l'air chaud assècheraient la surface des plantes et éviteraient la congélation superficielle des organes fructifères et, par conséquent, des dommages à l'intérieur de ceux-ci. En tout état de cause, l'énergie apportée est bien inférieure à celle perdue lors d'une nuit de gel radiatif (Snyder et de Melo-Abreu, 2005). Son efficacité serait très limitée en présence de vent et serait plus adaptée aux gelées de faible intensité (Lakatos & Brotodjojo, 2022).

Ces systèmes ont été efficaces lors de petites gelées jusqu'à 3°C mais n'ont pas donné satisfaction en Moyenne-Garonne lors des gelées de 2021 où il a fait entre -4 et -6°C (Source ACMG).

E.2.3.4. Combinaison de l'apport de chaleur et du mouvement de l'air

Afin de surmonter les inconvénients intrinsèques des systèmes qui fournissent de la chaleur (coûts élevés de main-d'œuvre et de combustible) et de ceux qui déplacent l'air (limités aux situations de forte inversion thermique de l'air et d'absence de vent), des combinaisons des deux systèmes ont été testées ces dernières années par les producteurs et les fabricants de tours à vent.

La combinaison de ventilateurs (fixes ou mobiles) avec des sources de chaleur est supposée être une alternative lorsque les conditions ne sont pas favorables à l'utilisation de ventilateurs.

Ces dernières années, des systèmes de chauffage à forte puissance calorifique (produits par des combustibles fossiles ou la biomasse) ont été mis au point pour être utilisés en combinaison avec des ventilateurs qui peuvent diffuser la chaleur générée (Figure 58).



Figure 58 : Système de chauffage antigel (pellets) à combiner avec le ventilateur.

De même, dans la région de Lleida, des tests sont effectués en combinant l'utilisation de petits fours (diesel ou biomasse) avec des ventilateurs mobiles.

Un élément essentiel de la réussite de ces combinaisons est l'emplacement des systèmes de chauffage afin que la distribution de la chaleur soit idéale en fonction de la topographie de la parcelle et du mouvement de l'air et, par conséquent, une étude préalable de la dynamique des masses d'air doit être réalisée.

En tout cas, vouloir pousser de l'air chaud à l'horizontale ou même avec une pente négative est contre nature car, par convection, l'air chaud cherche toujours à monter. Aussi des mesures dans les Pyrénées orientales dans les années 90 avaient conclu à la réduction de la surface de protection de la tour à vent qui ne poussait plus l'air jusque vers 100 m environ mais à seulement 60 à 70 m.

E.2.3.5. Couvertures thermiques qui réduisent les pertes de chaleur par le sol.

La couverture thermique agricole est un agrotexile spécialement conçu pour l'agriculture. Elle est composée de fibres continues de polypropylène liées entre elles par un procédé d'aiguilletage à chaud. Elle est installée à l'intérieur des serres ainsi qu'à l'air libre ou sous les filets paragrêles. Il existe des couvertures de 17 g et 30 g par mètre carré. Sa fonction principale est de protéger du froid, du gel et de la gelée jusqu'à -4°C. Elle protège les plantes du froid, du gel et de la gelée jusqu'à -4°C, car elle crée un microclimat entre le sol et la couverture qui favorise la croissance des cultures, en évitant qu'elles ne se détériorent avant la récolte.

Nous imaginons que la rosée ou du givre se forme à la surface des fibres, l'eau crée un effet de serre en absorbant le rayonnement infrarouge émis par le sol et les végétaux. À son tour ce film d'eau ou de givre rayonne vers le végétal à une température largement supérieure à celle de la voûte céleste ce qui ralentit le refroidissement de surface du sol et des végétaux.

Le coût peut être compris entre 116 € et 131 € suivant la largeur et l'épaisseur pour des rouleaux de 100 m. Ils sont principalement utilisés en horticulture.

E.2.4. Estimations économiques

Outre les conditions techniques de chacun des systèmes, les conditions économiques de leur utilisation sont également déterminantes pour définir les systèmes les plus adaptés aux multiples contextes qui peuvent se présenter.

Cette section présente les résultats de l'estimation des coûts des principaux régimes de protection active disponibles pour les producteurs ayant des prix en Espagne en 2023-2024.

L'estimation du coût de la protection obtenue pour chacun des systèmes est assez compliquée pour plusieurs raisons :

- La fréquence, l'intensité et les types de gelées susceptibles de se produire sont très incertains. Dans un contexte de réchauffement climatique, il est très probable que les schémas météorologiques observés au cours des dernières décennies seront différents de ceux qui pourraient se produire dans les années à venir.
- La fréquence et l'intensité des gelées (liées à la valeur économique de la culture) déterminent en grande partie la viabilité de la culture dans une zone ou une parcelle donnée. En ce sens, il est essentiel d'étudier les conditions météorologiques avant l'installation de la culture.
- Le type de gel (principalement advection et radiation) conditionne l'efficacité des systèmes et dans certains cas, comme ceux basés sur le mouvement de l'air pour mélanger les couches avec stratification de température, ils sont totalement inefficaces en l'absence d'inversion thermique. Dans tous les cas, la défense contre les gelées d'advection produites par l'entrée d'air froid en présence de vent est beaucoup plus compliquée que la défense contre les gelées de radiation.
- Le niveau de protection de certains systèmes varie en fonction de l'intensité de l'application des différents éléments (volume d'eau par hectare dans le cas de l'aspersion et de la micro-aspersion) ou de la concentration de réchauds ou de bougies de paraffine par surface dans les systèmes basés sur l'apport de chaleur). Il est donc également nécessaire de tenir compte du degré de protection souhaité ou possible.

- Actuellement, nous nous trouvons dans un contexte mondial de forte volatilité des prix, notamment ceux liés aux sources d'énergie et à certains matériaux ou composants, ce qui se traduit par une grande variabilité des coûts finaux des systèmes de fabrication et des combustibles utilisés dans leur fonctionnement.

Par conséquent, les évaluations effectuées doivent nécessairement être considérées comme des **estimations approximatives (basées sur des conditions spécifiques) et ne doivent être prises qu'à titre indicatif.**

Le coût global de la lutte contre le gel sera ventilé entre les coûts fixes (investissements, entretien et stockage) qui seront supportés qu'il y ait ou non du gel, et les coûts variables (préparation, manipulation et fonctionnement du système) qui seront proportionnels au nombre d'épisodes de gel par an et à leur durée. Ces concepts sont décrits ci-dessous :

- **Coût d'investissement.** Il correspond aux machines ou installations à acheter ou à installer sur les parcelles de manière permanente. Il s'agira, par exemple, d'installations d'irrigation par aspersion ou micro-aspersion, de ventilateurs (fixes ou mobiles) ou de chaufferettes.
- **Coût de l'entretien et du stockage des installations et des machines.** Pour garantir le succès de la lutte contre le gel, il est nécessaire d'avoir une sécurité maximale quant au bon fonctionnement des systèmes au moment voulu et à l'absence de pannes qui pourraient entraîner des pertes encore plus importantes que celles qui se seraient produites en l'absence du système de protection. Les systèmes d'irrigation doivent être vérifiés au préalable, afin de s'assurer qu'il n'y a pas de fuites et que les pompes, les arroseurs ou les micro-asperseurs sont en parfait état de fonctionnement. Il en va de même pour les ventilateurs fixes ou mobiles ou les systèmes impliquant l'utilisation de machines et de moteurs. En revanche, les systèmes qui peuvent être déplacés (chaufferettes, ventilateurs mobiles) doivent être conservés dans de bonnes conditions, dans des entrepôts à l'abri des intempéries, afin de garantir leur durabilité dans le temps.
- **Coût de la préparation au démarrage du système.** Ces coûts sont encourus chaque fois qu'une gelée est prévue, qu'elle se produise ou non, et quelle que soit sa durée ou son intensité. Ils comprennent des activités telles que la distribution et l'alimentation de réchauds ou de bougies de paraffine (et leur enlèvement une fois la période de gel terminée), le déplacement de systèmes de ventilation mobiles, etc.
- **Coût de la manutention et du fonctionnement du système pendant le gel.** Ces coûts seront principalement supportés à partir du moment où les systèmes de protection sont mis en service. Ils correspondent, d'une part, au coût de la main-d'œuvre nécessaire pour commander, démarrer, surveiller, entretenir et arrêter le système (dans le cas où le système ne démarre pas, le coût de la surveillance doit également être pris en compte). Il comprendra également le coût du carburant, de l'eau ou des sources d'énergie (combustibles fossiles, biomasse, électricité) nécessaires à l'entretien du système pendant la période de gel. Les calculs sont effectués en tenant compte d'un gel de 10 heures.

Les particularités des principaux systèmes de lutte contre le gel du point de vue du calcul des coûts sont décrites ci-dessous.

E.2.4.1. Bougies et réchauds

Comme expliqué dans la section E.2.1 il existe différentes options pour les systèmes qui fournissent de la chaleur directement à la parcelle de culture. Pour l'étude économique, quatre options sont envisagées :

- Bougies de paraffine
- Réchauds à gazole
- Chauffeuses de briquettes de bois modèle Wiesel, originaires d'Autriche
- Chauffeuses à pellets correspondant au modèle Viti-chauffe, de conception et de brevet français.

La comparaison de ces systèmes est compliquée car chacun d'entre eux présente des caractéristiques différentes en termes de facilité de stockage, de distribution et de manipulation pendant le gel. D'autre part, les différences de puissance calorifique et de conception de chaque système font que le nombre d'unités par hectare pour obtenir des conditions similaires est très différent. En ce sens, les données sur les augmentations de température obtenues par les systèmes sont rares et, dans la plupart des cas, fournies par les sociétés de commercialisation et quelques expériences menées dans d'autres pays européens. Il n'existe pas d'essais comparatifs indépendants réalisés dans nos conditions.

L'étude considère un nombre d'unités de chaque système par hectare donnant un apport de chaleur (basé sur le pouvoir calorifique du combustible et la consommation horaire de chaque système) et une élévation de température théorique similaire entre eux (Tableau 2).

Tableau 2 : Caractéristiques estimées des différents systèmes de lutte antigel par chauffage étudiés.

<i>Systeme</i>	<i>Modèle</i>	<i>Carburant</i>	<i>Capacité du système (kg)</i>	<i>Durée combustion (heures)</i>	<i>Valeur calorifique (Kcal/kg)</i>	<i>Taux de combustion (kg/heure)</i>	<i>Énergie libérée (kcal / heure)</i>	<i>Densité d'utilisation (Ud/ha)</i>	<i>Énergie libérée (Kcal/ha)</i>
Bougies	Givre de feu	Paraffine	5,8		11.000	0,48	5.313		2.125.200
Chauffeuses	Communes	Diesel		10	10.250	3,40	34.850		2.091.000
Chauffeuses	Wiesel	Briquettes			4.700	3,33	15.667	135	2.115.000
Chauffeuses	Viti-Chauffe	Pellet	30	8	4.700	3,75	17.625	120	2.115.000

Outre le coût économique, d'autres aspects sont plus favorables ou défavorables à l'utilisation de chacun des systèmes. Ceux qui utilisent des combustibles à base de biomasse (pellets ou briquettes) sont beaucoup plus durables et participent au concept d'économie circulaire. En même temps, ils génèrent beaucoup moins de fumée que ceux basés sur des combustibles fossiles (diesel ou paraffine). En revanche, la manipulation des combustibles solides et l'allumage des réchauds sont plus compliqués que dans le cas des bougies de paraffine.

E.2.4.2. Aspersions et micro-aspersions

Dans les systèmes de contrôle basés sur l'application de l'eau (aspersions et micro-aspersions), l'investissement à réaliser est très variable en fonction des caractéristiques antérieures de la parcelle (surface irriguée à partir d'une même station d'irrigation, topographie, pression de pompage ou pression naturelle pour la mise en pression de l'eau, qualité de l'eau, etc.) Chaque exploitation nécessiterait une étude détaillée des contraintes et des coûts de l'installation. Pour l'estimation de ces coûts, il a été considéré que, dans de nombreux cas, les mêmes installations

seront utilisées pour l'irrigation des cultures et que, par conséquent, une partie de l'investissement dans le système d'irrigation a été attribuée à la protection contre le gel.

Dans les systèmes d'irrigation par aspersion, étant donné le plus grand volume d'eau appliqué, il est nécessaire d'installer un système de tuyaux principaux et secondaires pour transporter l'eau jusqu'à la parcelle avec une plus grande capacité que ceux utilisés pour l'irrigation au goutte-à-goutte. Dans le cas des systèmes de micro-aspersion, le débit utilisé est plus proche de celui de l'irrigation goutte à goutte et, dans de nombreux cas, les mêmes tuyaux peuvent être utilisés, ce qui permet de réduire les investissements.

Le coût de la gestion est également variable en fonction de la topographie du terrain et des besoins de lavage d'eau associés, ainsi que de la disponibilité d'une pression naturelle qui ne nécessite pas l'utilisation d'une source d'énergie externe. De même, le coût de l'eau peut être très variable en fonction de sa source.

E.2.4.3. Chauffages mobiles

Le modèle Frostbuster 501 de la société Agrofrost est utilisé comme référence pour l'estimation. Dans ce cas, le carburant utilisé est le propane. Avec cette machine, il est recommandé d'effectuer un circuit à travers la parcelle à protéger à une vitesse maximale de 7,5 km/h, en passant à travers les rangées de cultures à une distance maximale de 100 m. Selon les instructions des développeurs de la machine, il faut s'assurer que le Frostbuster n'est pas endommagé et qu'il n'y a pas de risque de contamination. Selon les instructions des concepteurs de la machine, il faut veiller à ce que le chauffage passe sur la même position toutes les 9 minutes au maximum. Dans ces conditions, une machine peut couvrir une superficie d'environ 7 ha.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'augmentation globale de la température dans la parcelle serait faible et l'effet bénéfique proviendrait du réchauffement et de l'assèchement périodique des organes fructifères.

E.2.4.4. Ventilateurs. Tours fixes ou mobiles

Dans le système basé sur le brassage des couches d'air dans les situations d'inversion thermique, des ventilateurs fixes ou mobiles peuvent être utilisés.

Afin de réaliser l'estimation économique des systèmes fixes, un modèle de grande tour (10-11 m de haut) a été pris comme exemple. Pour ce type de ventilateur, on dit commercialement qu'il peut couvrir jusqu'à 7 ha. Cette valeur est probablement trop optimiste et ne se produirait que dans des situations optimales, qui sont très souvent éloignées des situations réelles. Pour effectuer les calculs, on a considéré que chaque appareil couvre une surface de 4 ha.

La référence pour les ventilateurs mobiles est le ventilateur Tow and Blow 250h avec un moteur de 24 CV, d'origine néo-zélandaise (Figure 52). Ils sont principalement indiqués dans les zones plates avec de grandes plantations et dans des conditions d'inversion thermique et d'absence de courants d'air. Dans les zones non plates, il est important d'étudier l'emplacement des ventilateurs en fonction du mouvement des masses d'air. Il n'existe pas d'études publiées sur la zone de couverture des ventilateurs. Dans le commerce, le fabricant prévoit une surface maximale de 5,5 ha, ce qui, comme dans le cas précédent, est probablement surdimensionné par rapport aux conditions réelles. Pour effectuer les calculs, on considère une zone de couverture de 2,5 ha.

Il serait intéressant de fournir un chiffre de coût de fonctionnement en fonction du gain en température espéré mais ce type d'étude n'existe pas. Seule l'expérience montre que les systèmes par chauffage ou par brassage d'air n'ont pas pu protéger des gelées de rayonnement

à partir de températures inférieures à -3.5°C ou -4°C durant au moins 15 minutes alors que les systèmes par aspersion sur frondaison (avec $40\text{ m}^3/\text{h. ha}$) ont permis de protéger jusque vers -6°C .

Sur la base de toutes ces considérations, les coûts des principaux systèmes de défense active ont été estimés et les résultats sont présentés dans le Tableau 1

Tableau 1.-Résumé des principales caractéristiques et des coûts d'investissement et de fonctionnement de divers systèmes actifs de protection contre le gel.

Système	Aspersion sur frondaison	Micro-pulvérisation	Bougies de paraffine	Chaufferettes briquettes	Poêles à granulés	Réchauds à gazole	Tours anti-gel fixes	Ventilateurs portables	Chauffage mobile
<i>Principales caractéristiques</i>	³ Débit : 35-45 m ³ /ha heure Pression : 35-45 m.c.a.	³ Débit : 15-25 m ³ /ha par heure Pression : 15-25 m.c.a.	Alimentation en chaleur avec des bougies de paraffine 6,3 L	Alimentation en chaleur Briquettes Chaufferettes Wiesel 20 kg	Pellets d'alimentation en chaleur Viti-Chauffe (30 kg)	Chauffage au fioul Poêles 40 L	Mouvement d'air Tour antigel fixe de 10 à 11 m de haut	Ventilateurs portables Tow&Blow 250 h	Frostbuster 501 Vitesse max. 7,5 km/h Fréquence de passage : 9 min. Surface : environ 7 ha
<i>Augmentation estimée de la température (°C)</i>	Jusqu'à 6°C	3-5°C	2,5-3°C	2,5-3°C	2,5-3°C	2,5-3°C	0,5-2°C	0,5-2°C	0,5°C
<i>Efficacité du rayonnement du gel en cas d'inversion thermique</i>	***								
<i>Efficacité de l'advection du gel sans inversion thermique</i>			*	*	*	*	0	0	*
<i>Investissement initial total (€/ha)</i>	6000-8300	3400-8200		7.600	25.300	8.300	61.000	42.000	27.800
<i>Durée de vie utile (années)</i>				10					
<i>Superficie couverte (ha)</i>	1	1	1	1	1	1		2,5	
<i>Unités par ha</i>				135					
<i>Investissement annuel (€/ha)</i>	400 - 550	225 - 550		760	1265	415	1017	1120	265
<i>Coût annuel d'entretien/ entrepôt (€/ha)</i>	300-420	175-400	80	0			550	380	
<i>Coût de la préparation du système (par 10 h de gel) (€/ha)</i>	0	0	140	150	260	65	0		30
<i>Coût du contrôle et de la gestion (par 10 heures de travail) (€/ha)</i>	175	175	230	390	390	200	50	75	
<i>Coût du carburant, l'électricité ou de l'eau (pour 10 heures de fonctionnement) (€/ha)</i>	20-85	10-45	4500	1170	1575	3600	98	30	110
<i>Coût total de la protection (investissement + entretien + préparation + fonction 10 h) (€/h)</i>	880 - 1200	580-1165	4950	2470	3610	4340	1714	1638	682

E.2.5. Considérations sur les systèmes de protection contre le gel

Une bonne protection contre le gel commence dès la planification d'un projet de plantation. L'étude de la probabilité de gel et du risque de dégâts dans la zone, ainsi que l'étude microclimatique de la parcelle, sont essentielles pour garantir une localisation correcte des plantations et éviter des bouleversements économiques une fois que l'investissement dans la plantation (parfois très élevé) a déjà été réalisé.

Les conditions dans lesquelles le gel se produit sont très variables d'un épisode à l'autre et également tout au long de la nuit où le gel se produit. Le développement de systèmes de prévision et d'aide à la décision à une échelle plus locale deviendra de plus en plus important.

En ce qui concerne les systèmes de protection active, il n'existe pas de système universellement adaptable et ils présentent tous des aspects positifs et négatifs et des limites qui les rendent plus ou moins applicables dans différents contextes de production.

Tous les systèmes peuvent être utiles dans certaines circonstances, mais si l'on dispose de suffisamment d'eau et de pression pour l'appliquer, le système de défense par aspersion est celui qui offre la meilleure couverture dans les différentes conditions de gel. **Les systèmes d'irrigation par aspersion ou micro-aspersion continue ou intermittente sont les plus avantageux car ils permettent une augmentation considérable de la température dans tous les types de gel et leur coût est le plus bas par rapport à la protection qu'ils peuvent offrir** (entre 600 et 1 200 €/ha pour 10 heures de gel). Leur principale limite est la grande quantité d'eau (et la sécurité de sa disponibilité) nécessaire pour que le système puisse fonctionner sans interruption pendant les heures nécessaires. À cet égard, le système de micro-aspersion serait le plus prometteur en raison de son investissement plus faible et de ses besoins moindres en eau et en énergie pour le pompage, mais les conditions de conception hydraulique devraient être étudiées de manière plus approfondie pour l'optimiser autant que possible.

Les systèmes de ventilation fixes ou portables **ne fonctionnent que dans des situations d'inversion thermique**, sans vent, et leur efficacité dépend largement de la différence de température entre les couches d'air et de la distance par rapport au ventilateur. Leur coût de fonctionnement est plus élevé que celui des systèmes à eau (environ 1700-1800 €/ha/an pour 10 heures de gel) et le niveau de protection qu'ils offrent est limité et souvent incertain.

Dans les systèmes basés sur des **chaufferettes ou des réchauffeurs**, l'efficacité dépend principalement du nombre de points d'émission installés et de leur puissance calorifique. Pour obtenir des augmentations de température appréciables (2,5-3°C), un grand nombre d'unités est nécessaire (60 à 400 par ha selon le modèle) et leur coût d'exploitation est assez élevé (entre 2500 et 5000 €/ha). Il s'agit de systèmes complexes en termes de fonctionnement, d'allumage et d'entretien, et les combustibles à base de pétrole ne sont pas très durables et génèrent une grande quantité de fumée. Ils conviendraient aux petites parcelles avec des cultures de grande valeur et des gelées peu fréquentes, lorsque d'autres méthodes ne sont pas possibles.

Avec l'expansion des filets anti-grêle et des auvents anti-pluie, leur performance en tant que systèmes de protection contre le gel, soit individuellement, soit en combinaison avec d'autres systèmes (chauffages statiques ou mobiles, systèmes d'irrigation), devra également être étudiée.

Par conséquent, et malgré l'expérience accumulée au fil des ans avec les différents systèmes, il est nécessaire de continuer à étudier et à expérimenter leur utilisation afin de minimiser les conséquences des gelées printanières sur la production agricole, en particulier lorsque nous nous trouvons dans un contexte du réchauffement climatique qui entraîne paradoxalement une augmentation de ce phénomène.

Références

- Hu Y G, Wu W Y, De Melo-Abreu J P, Shapland T M, Zhang H, Snyder R L.(2015). Expériences comparatives et évaluation de l'efficacité des ventilateurs verticaux (VBF) pour la protection contre le gel. *Int J Agric & Biol Eng*, 2015 ; 8(5) : 36-42.
- Hu Y G, Asante E A, Lu Y Z, Mahmood A, Buttar A N, Yuan S Q. (2018). Examen de la technologie de perturbation de l'air pour la protection des plantes contre le gel. *Int J Agric & Biol Eng*, 2018 ; 11(3) : 21-28.
- Lakatos, L ; Brotodjojo, R.R. (2022). *IOP Conf. Ser. : Earth Environment. Science* 1018
- Reese R. L ; Gerber, J. F., (1969). An empirical description of the cold protection provided by a wind machine. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 94(6);697-700.
- Snyder, R. L. ; De Melo-Abreu, J. P. (2005). Protection contre le gel : principes, pratique et économie. Vol. I. Nations unies, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 223 p.

E.3. Protection chimique contre le gel

E.3.1. Introduction

Les dommages causés par le gel sont dus à la formation de glace à l'intérieur des tissus végétaux. Les dommages peuvent être directs lorsque des cristaux de glace se forment à l'intérieur des cellules ou indirects lorsque la glace se forme dans l'espace intercellulaire, provoquant la déshydratation et la détérioration des membranes cellulaires adjacentes (Snyder et De Melo-Abreu, 2010).

Lorsque des conditions de gel surviennent, des cristaux de glace commencent à se former dans les espaces extracellulaires. Le point de départ de la formation de glace se situe au niveau des agents de nucléation de la glace (INA), qui sont des particules présentes à l'intérieur et à l'extérieur des tissus, à partir desquelles la formation de cristaux est déclenchée. Ces particules peuvent être des cristaux de neige, de la poussière, des particules inorganiques et surtout des bactéries nucléantes. En l'absence de ces agents, l'eau contenue dans les tissus, y compris les bourgeons et les fleurs, peut rester à l'état liquide à des températures inférieures à 0°C, en état de surfusion (en effet, le point de congélation de l'eau pure est d'environ -40°C).

Dès le début de la formation de la glace, des molécules d'eau sont ajoutées à la structure cristalline et des solutés sont libérés, ce qui augmente la concentration de la solution restante (Gupta et Deswall, 2010). Cela crée une diminution du potentiel osmotique et un écoulement d'eau de l'intérieur de la cellule vers l'extérieur pour compenser le gradient osmotique avec le cytoplasme, ce qui entraîne une rupture de la membrane cellulaire et une déshydratation de la cellule avec une perte de volume subséquente qui peut entraîner son effondrement ou sa rupture (Pearce, 2001). Selon les conditions, de la glace peut également se former à l'intérieur de la cellule, et la croissance des cristaux provoque un stress physique, entraînant des dommages irréversibles aux membranes cellulaires et la mort de la cellule.

Les plantes et leurs tissus ont développé deux stratégies pour faire face au stress du gel : la tolérance et l'évitement. La première stratégie permet aux plantes et/ou à leurs tissus de tolérer la présence de glace dans les espaces extracellulaires sans subir le stress de déshydratation qui en découle. La seconde stratégie est la capacité des plantes à éviter la formation de cristaux de glace interstitiels. Bien que ces deux stratégies soient clairement différentes, elles peuvent se retrouver simultanément dans la même plante (Levitt 1980). Les tissus qui évitent le gel le font en s'isolant des basses températures ou en limitant la formation de cristaux de glace dans leurs tissus en maintenant l'eau liquide dans un état de surfusion inférieur à 0°C. Ces tissus peuvent abaisser la température de nucléation de la glace en synthétisant des osmolytes dans leurs fluides, bien qu'en raison de la grande quantité de soluté nécessaire pour abaisser significativement le point de congélation, l'abaissement réel du point de congélation qui peut être obtenu n'est que de 1 à 2°C (Levitt 1980).

Un aspect fondamental de la tolérance des plantes tempérées au froid est le processus d'acclimatation qui permet aux plantes d'augmenter leur tolérance lorsqu'elles sont exposées à des températures froides, mais non glaciales. Ce processus produit différentes réponses, notamment des altérations de la membrane plasmique et l'accumulation de solutés à l'intérieur des cellules (Uemara et al, 2006).

En outre, on sait que le contenu du cytoplasme et des organites cellulaires influence le comportement des membranes plasmiques pendant l'acclimatation et le gel. En général, une augmentation de la concentration en solutés entraîne une diminution des dommages causés par la déshydratation aux cellules (Lewitt 1980). Les solutés de faible poids moléculaire, outre leur

effet sur la diminution du potentiel osmotique de la cellule, peuvent avoir des effets cryoprotecteurs spécifiques (comme dans le cas des protéines et des sucres) qui protègent les membranes et agissent comme des antioxydants (proline) ou comme des agents qui aident au processus de récupération après congélation (glycine-bétaïne) (Uemura et al, 2006).

Le gel (ainsi que d'autres incidents environnementaux) provoque un stress qui se manifeste par une altération du système d'équilibre oxydo-réduction des tissus. Les plantes ont un système antioxydant qui fait partie de leur métabolisme dans lequel, dans des conditions non stressantes, il y a un équilibre entre la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), (anion superoxyde, peroxyde d'hydrogène et radical hydroxyle entre autres) et leur élimination. Les ROS agissent comme des messagers secondaires dans la transduction des signaux à de faibles concentrations, tandis qu'à des concentrations plus élevées, ils provoquent des dommages oxydatifs qui conduisent finalement à la mort des cellules. Le stress dû au gel entraîne une accumulation accrue de ROS dans les tissus affectés, que les plantes tentent de contrer à l'aide de divers antioxydants dont la production est également induite par le froid. Parmi ces antioxydants figurent l'acide ascorbique (vitamine C), l'alpha-tocophérol (vitamine E), le glutathion, la superoxyde dismutase, la cystéine synthétase et d'autres caroténoïdes et composés phénoliques. Leur présence dépend de l'espèce et leur concentration plus ou moins élevée a été associée à la résistance au froid (Ambroise et al, 2020).

E.3.2. Utilisation de produits chimiques pour la protection contre le gel

L'étude de divers produits chimiques qui peuvent être facilement stockés et appliqués et qui fournissent une protection contre le gel remonte au milieu des années 1950 (Perry 1998). On a attribué à ces produits la capacité de modifier le point de congélation des tissus, de réduire la présence de bactéries glaçogènes dans les cultures ou d'affecter la phénologie en retardant l'émergence de la phase de résistance des cultures, et parfois leur mode d'action n'était pas connu.

Actuellement, la protection chimique contre le gel comprend l'utilisation d'engrais conventionnels (par exemple, azote, potassium, bore), de produits hormonaux (régulateurs de croissance), d'acides aminés et de protéines, d'hydrates de carbone, de produits antitranspirants et biostimulants. Sur le plan commercial, on leur attribue des capacités de régulation osmotique, de cryoprotection et/ou d'antioxydation, qui ne sont pas toujours étayées par des études scientifiques. Dans ce chapitre, nous ferons le point sur l'effet des différents produits et leur application pratique dans la lutte contre le gel.

E.3.2.1. Éléments minéraux

Une nutrition minérale correcte, comprenant les bonnes doses et le bon moment d'application, est essentielle au développement de la plante et à sa tolérance aux effets du gel. Les déséquilibres nutritionnels peuvent avoir un effet négatif sur la culture et sa protection contre le gel.

La capacité de certains nutriments minéraux à protéger les cultures contre le stress dû au froid et à réduire les dégâts causés par le gel a été évaluée par différents auteurs. Cependant, les résultats de la littérature scientifique montrent que l'efficacité des nutriments minéraux est variable et dépend du type de nutriment et de la culture.

Le **potassium** est l'un des ions les plus abondants dans les tissus végétaux. Il est dissous à l'intérieur de la cellule et dans les espaces intracellulaires, maintenant l'ajustement osmotique et contribuant à abaisser le point de congélation en augmentant la quantité de soluté. Chez la vigne, il a été montré que les apports de potassium sous forme de sulfate de potassium augmentaient significativement la tolérance au froid en augmentant la quantité d'hydrates de carbone, de

proline et de protéines présentes dans les pousses (Sarikhani et al., 2014). Ces résultats ont été confirmés par Karimi (2017) qui a observé que l'application de sulfate de potassium à 3% réduisait les effets du stress dû au gel sur la vigne, en augmentant la teneur en polyamines libres, en sucres solubles, en phénols et en acide abscissique dans les plantes traitées. L'application de sulfate de potassium a également permis d'augmenter considérablement la résistance au froid des tomates (Donderalp, 2022). Chez l'olivier, on a observé que des applications de potassium à 2 % augmentaient la présence de composés osmolytiques et l'activité des enzymes antioxydantes, ce qui a été corrélé avec une augmentation de la résistance au froid des plantes traitées (Saadi et al., 2021).

Le **calcium** joue également un rôle important dans la tolérance des plantes aux basses températures, bien que son mécanisme d'action ne soit pas encore tout à fait clair (Roman-Figueroa et al., 2020). Le calcium est un élément clé dans la composition des membranes cellulaires, dont il améliore la fluidité et la stabilité. Selon certaines études, des applications foliaires accrues de calcium peuvent induire la fermeture des stomates et prévenir la déshydratation des feuilles (Waraich et al., 2012 ; Wilkinson et al., 2001), en plus de renforcer les membranes cellulaires, car le calcium se lie aux lipides et aux protéines des membranes, empêchant la fuite des solutés. Lors d'essais menés sur des raisins de table en Iran, il a été observé que des applications de sulfate de calcium et de sulfate de zinc avant le débourrement augmentaient leur tolérance au froid (Karimi, 2019).

Le **bore** s'est avéré efficace pour améliorer la tolérance au gel des plantes en stabilisant la paroi cellulaire et sa fonction, en plus de son rôle dans la régulation de la perméabilité de la membrane cellulaire (Brown et al., 2002). Il a été démontré que les applications de bore ont un effet sur la date de floraison des amandiers. Une étude menée par l'IRTA (Rufat et Arbones, 2006) sur des amandiers en conditions pluviales a montré que les applications foliaires de bore en automne, en plus d'augmenter la nouaison, pouvaient induire un retard de la date de floraison de 4 à 6 jours, ce qui réduisait le risque de dégâts dus aux gelées tardives.

E.3.2.2. Régulateurs de croissance

Les régulateurs de croissance sont des composés associés à divers processus de croissance des plantes. Le retardement de la floraison est le principal mécanisme de ce type de produit dans la protection contre le gel.

Les retardateurs de croissance des pousses, tels que le paclobutrazol et l'acide abscissique (ABA), se sont révélés efficaces pour prévenir les dommages causés aux pousses par les basses températures. Ces composés agissent en ralentissant la croissance de la plante et en favorisant la dormance des pousses.

Le **paclobutrazol** peut se comporter comme un antitranspirant, en diminuant la longueur des stomates et en augmentant leur densité. Le paclobutrazol est également un inhibiteur de la biosynthèse de l'acide gibbérellique qui, en stimulant sa croissance, peut augmenter la sensibilité des plantes au froid.

En Nouvelle-Zélande, on a constaté que l'application d'**ABA** sur des citronniers augmentait leur résistance au gel (Dwyer et al., 1995). Dans plusieurs essais sur des vignes aux États-Unis, l'ABA n'a pas eu d'effet significatif sur le retard de démarrage de la végétation (Wang et Dami, 2020) mais a entraîné une augmentation de la tolérance au gel de cette culture (Wang et al, 2000 b).

L'application d'**huiles minérales** en hiver avant la floraison était une pratique traditionnelle pour lutter contre les insectes et les champignons dans les arbres fruitiers et les vignobles. Ces produits ne pouvaient pas être utilisés (ou à très faibles doses) dans la phase végétative des plantes en

raison de leur phytotoxicité sur les parties vertes. Avec des doses élevées de ces produits, on peut observer un retard dans la pousse des arbres. Actuellement, les huiles minérales sont pratiquement éliminées des registres phytosanitaires et sont remplacées par des huiles végétales d'origines diverses telles que le soja, les crucifères (colza, tournesol, etc.), les graines de maïs ou de coton. Dans le cas de la vigne, de nombreux essais ont été réalisés avec des huiles dans le but de retarder le débourrement et d'éviter les périodes de plus grand risque de gel. Dans des essais menés aux Etats-Unis sur plusieurs années, l'application d'huile minérale ou végétale (soja) a permis de retarder le débourrement de 2 à 20 jours selon la variété, le moment de l'application et la couverture du produit (Dami et Beam, 2004). Toutes les huiles peuvent être phytotoxiques au-delà d'une certaine concentration (5% pour les huiles minérales et 10% pour l'huile de soja). Plus le traitement est effectué à un stade proche au débourrement, moins il a d'effet et aucun retard dans la date de maturation n'a été observé, sauf si le traitement a été fait avant de deux semaines du débourrement. Les essais dans ce domaine se sont poursuivis dans la région et cette méthode est considérée comme l'une des plus intéressantes pour retarder le débourrement de la vigne, bien que des résultats incohérents soient parfois observés (Loseke et al., 2015), (Wang et Dami, 2020), (Persico et al., 2021).

L'**éthéphon** est un régulateur de croissance qui libère de l'éthylène lorsqu'il est métabolisé. De nombreuses études ont montré que son application en automne peut retarder efficacement le début de la floraison au printemps suivant chez différentes espèces, en particulier chez les fruits à noyau. Le retard peut aller de 3 à 18 jours, en fonction de la culture, des concentrations et du moment de l'application. En général, les applications au début de l'automne à des concentrations élevées sont plus efficaces. Par exemple, l'application d'éthéphon sur des pruniers à 10 % de chute des feuilles à 250 et 500 ppm a retardé la floraison de 13 et 16 jours, respectivement, et de 5 et 7 jours lorsqu'elle a été appliquée à un stade plus avancé de 50 % de chute des feuilles (Crisosto et al., 1990). Dans un essai réalisé par l'IRTA sur des amandiers de la variété "Vairo", des retards de floraison de 4 à 7 jours ont été obtenus avec une réponse positive à une augmentation de la dose de 50 à 200 ppm. Cependant, un retard plus important a également entraîné une perte de rendement. Dans tous les cas, l'efficacité de l'éthéphon semble être limitée au stade pré-dormant et pratiquement aucun effet n'est observé lorsqu'il est appliqué pendant la dormance. Il est également important de noter les effets nocifs possibles de son application, tels que la gommose, la chute des bourgeons et des fleurs, la nécrose des extrémités des pousses, l'absence d'ouverture des bourgeons floraux et la réduction du rendement.

E.3.2.3. Acides aminés et protéines

Certains acides aminés libres sont associés à l'exposition au froid et à la résistance au gel. Ils agissent comme des solutés compatibles et stabilisent les membranes et les protéines de la même manière que les sucres. L'un des acides aminés qui s'accumule fréquemment est la **proline** (Öktem et al. 2008). Outre ses propriétés de soluté compatible, la proline stabilise les polyribosomes et agit comme un piègeur de ROS et un tampon de pH et d'oxydoréduction (Hayat et al. 2012).

La **glycine bêtaïne** est considérée comme un outil agronomique intéressant pour augmenter la tolérance aux stress environnementaux tels que les basses températures. Dans ce sens, nous pouvons citer le travail d'Ellena et al. 2024, qui, lors de gelées de fin de printemps et de début d'été (-2,34°C pendant 3,5 heures) sur de jeunes châtaigniers, les arbres traités avec de la glycine bêtaïne ont montré une meilleure récupération par rapport au contrôle non traité.

Certains organismes vivant au froid (plantes arctiques, insectes et poissons) sécrètent des **protéines antigél (AFP)** qui leur confèrent une tolérance à la congélation (Wisniewski et Fuller 1999) ; (Griffith et Yaish 2004), (Gupta et Deswall, 2010). Ces protéines agissent en inhibant la

croissance des cristaux de glace dans l'espace extracellulaire des cellules (Griffith et Yaish 2004) et inhibent la recristallisation de la glace qui se produit pendant les cycles répétés de gel-dégel lorsque les plantes sont exposées à de basses températures pendant une période prolongée (Wisniewski et Fuller, 1999, Griffith et Yaish, 2004).

E.3.2.4. Glucides

Les **oligosaccharides** (saccharose, maltose, tréhalose, etc.) et les polyols (sorbitol, mannitol, érythriol, etc.) sont associés à l'acclimatation au froid et à la résistance au gel et ont divers effets protecteurs. Certains protègent également les cellules des dommages oxydatifs en piégeant activement les ROS (Keunen et al. 2013). Parmi eux, la raffinose, le galactinol, le sorbitol, le mannitol et le myoinositol semblent être les piègeurs de radicaux libres les plus efficaces (Morsy et al., 2007, Folgado et al., 2015).

Molécules solubles de faible poids moléculaire qui s'accumulent à des concentrations élevées sans effet cytotoxique, elles contrecarrent en solution le stress osmotique provoqué par le gel. Ils abaissent de manière colligative le point de congélation et semblent être déterminants dans le processus de vitrification de l'eau (Wolfe et Bryant 1999, Strimbeck et al. 2015). À cet égard, l'accumulation de glucides simples joue un rôle prédominant dans la tolérance aux températures extrêmement basses (inférieures à -40 °C) chez les plantes ligneuses en favorisant la vitrification de l'eau plutôt que sa cristallisation (Mensink et al. 2017). Ils stabilisent les membranes et les protéines lors d'une déshydratation intense. Le tréhalose et le maltose sont particulièrement efficaces dans cette fonction, même à faible concentration (Wolfe et Bryant 1999).

Les **nanocristaux de cellulose (CNC)** sont des nanobiomatériaux connus pour leur faible conductivité thermique et leurs propriétés biodégradables. Leur porosité et leur stabilité étant supérieures à celles d'autres biomatériaux naturels, ils ont été largement utilisés comme matériaux dans d'autres domaines qui tirent parti de leurs propriétés d'isolation thermique. Les CNC se sont révélés efficaces contre les dommages causés par le gel dans les cerises et les raisins (Alhamid et al, 2018) et dans les pêches (Lee et al, 2021). Dans cette dernière culture, un traitement avec une concentration de 2 % de CNC a augmenté la résistance au gel de manière variable en fonction de la température minimale atteinte et du stade phénologique de la culture.

E.3.2.5. Antitranspirants et biostimulants

Parmi les produits de protection contre le gel, il existe des formulations antitranspirantes appliquées par voie foliaire qui, selon les fabricants, ont un effet protecteur contre le gel, et des produits biostimulants spécifiquement développés comme traitements préventifs contre le gel. Différentes formulations de ces produits peuvent être trouvées au niveau international. Toutefois, les informations scientifiques étayant leur efficacité sont limitées (Roman-Figueroa et al., 2020).

Les **anti-transpirants** agissent en formant une membrane semi-perméable à base de polymères organiques qui empêche la perte d'eau, en ralentissant le gel et en évitant la déshydratation des plantes. Le polymère bêta-pinène (di-1-p-menthène), obtenu à partir de la résine de pin, est l'un des ingrédients les plus couramment utilisés dans ce type de formulation. Lorsqu'il est appliqué, il forme un film lipophile flexible sur la surface extérieure des tissus, qui résiste à la pénétration de l'humidité dans les tissus en raison d'une mouillabilité réduite. La protection contre le gel est probablement basée sur cette barrière physique qui empêcherait la formation de glace extrinsèque (Roman-Figueroa et al., 2020). En Espagne, il existe plusieurs produits commerciaux formulés avec des résines qui sont commercialisés avec la fonction de protéger ou d'atténuer la transpiration des plantes sous n'importe quel type de stress abiotique (gel, chaleur, eau,

radiation, etc.). Toutefois, leur efficacité et leur mode d'action en tant que protecteurs contre le gel ne sont pas entièrement prouvés.

Les **biostimulants** sont une catégorie commerciale de produits qui peuvent inclure divers composants ayant des modes d'action différents (dans certains cas inconnus). Certains de ces composants sont :

- Le **polyéthylène glycol** s'est avéré efficace pour réduire le point de congélation en empêchant la formation de glace extracellulaire et en augmentant la résistance au froid des organes traités.
- Sels minéraux à base de bore et/ou de potassium (dont le mécanisme d'action a déjà été évoqué plus haut),
- Antioxydants d'origine naturelle qui agissent en neutralisant les radicaux libres qui se forment dans les membranes cellulaires. L'**alpha-tocophérol** est l'antioxydant naturel qui s'est avéré le plus efficace contre les dommages causés par le froid. Les effets de l'alpha-tocophérol et du glycérol ont été évalués séparément et en combinaison avec des résultats favorables sur la pomme et la tomate (Wolfel et Noga, 1998). En outre, l'application exogène d'alpha-tocophérol peut contribuer à maintenir la stabilité et l'intégrité des membranes cellulaires en cas de stress abiotique (Sadiq et al., 2019).
- Les **phospholipides**, en particulier les phospholipides insaturés, sont parmi les composants les plus importants de la membrane cellulaire et leur concentration augmente lorsque les plantes sont exposées à de basses températures. Il a été observé que l'application exogène de phospholipides insaturés peut reproduire les effets des phospholipides endogènes lors de l'acclimatation au froid et contribuer à maintenir l'intégrité de la membrane (Krahn, 2020).
- Glucides et autres composés organiques qui agissent comme cryoprotecteurs et maintiennent l'équilibre osmotique (mentionné ci-dessus).

L'un des premiers produits commerciaux combinant divers composants (bore, alpha-tocophérol et polyéthylène glycol) est **Basfoliar® Frost Protect** ou **Compo® Frost Protect** by Compo. Différentes études sur son efficacité sur pêcher et amandier ont été menées à l'IRTA, concluant que le produit pouvait réduire la mortalité des fleurs de 50 % à 10 % en cas de gelées dès -5 °C, la réduction des températures de 1,5 °C à 2 °C correspondant à 10, 50 et 90 % de mortalité (Torres et al., 2017).

Un autre produit commercialement disponible en Espagne pour augmenter la résistance au gel est **Kryoss** (fabriqué par Sustainable Agro Solutions). Selon son fabricant, Kryoss est un biostimulant contenant des composés osmoprotecteurs, cryoprotecteurs et antioxydants qui confèrent une tolérance et préviennent les dommages causés par le gel. Dans certaines études réalisées par l'IRTA sur des poires 'Conference', l'application de Kryoss a entraîné une augmentation de 20 % des fleurs viables (sans dommages dus au gel) après un gel de -3,5 °C dans des conditions contrôlées. Sur les pêches, l'application de Kryoss 48 heures avant une période de 3 jours avec des températures minimales de -3,7 °C a augmenté de 14 % le nombre de fleurs non affectées par le gel.

Au Portugal, pour les arbres fruitiers, l'utilisation de biostimulants tels que l'**acide orthosilicique** a été une pratique suivie par certains producteurs comme moyen d'augmenter la résistance des plantes aux basses températures pendant la période critique de gel. Toutefois, l'efficacité de cette pratique n'a pas été démontrée.

E.3.3. Conclusions

Il existe une large gamme de produits d'atténuation des dégâts causés par le gel sur le marché international. Le mode d'action de ces produits varie en fonction du type de produit et de sa

formulation. Traditionnellement, l'éthéphon est utilisé pour retarder la date de floraison et échapper à la période de risque de gel. Cependant, l'utilisation de ce phytorégulateur n'est pas autorisée dans certains pays et son application peut présenter un risque en termes de réduction des rendements. De même, les huiles minérales et végétales ont été utilisées dans le même but, mais les limites réglementaires actuelles restreignent leur utilisation.

D'autre part, il existe actuellement une large gamme de produits antitranspirants et biostimulants disponibles dans le commerce contre le gel, bien que leur effet, dans de nombreux cas, ne soit pas étayé par des études concluantes et qu'il y ait peu d'informations scientifiques sur leur mode d'action. Il serait intéressant de poursuivre les expériences en conditions contrôlées avec ces produits, qui pourraient fournir une certaine protection (même si elle n'est que partielle) dans le cadre d'une stratégie combinée de lutte contre le gel.

Références

- Alhamid, J.O.; Mo, C.; Zhang, X.; Wang, P.; Whiting, M.D.; Zhang, Q. (2018). Les nanocristaux de cellulose réduisent les dommages causés par le froid aux bourgeons reproducteurs des cultures fruitières. *Biosyst. Eng.*, 172, 124-133.
- Ambroise V., Legay S., Guerriero G., Hausman J.F., Cuypers A., Sergeant K. (2020). The Roots of Plant Frost Hardiness and Tolerance (Les racines de la résistance et de la tolérance au gel des plantes). *Plant Cell Physiol.* Jan 1;61(1):3-20. [doi:10.1093/pcp/pcz196](https://doi.org/10.1093/pcp/pcz196)
- Bartosz, G. (1997). Oxidative stress in plants. *Acta physiologiae plantarum*, 19(1), 47-64. <https://doi.org/10.1007/s11738-997-0022-9>
- Bredow, M., Tomalty, H. E., Smith, L. et Walker, V. K. (2017). Activités glaciaires et antinucléaires d'une protéine de liaison à la glace provenant de l'herbe annuelle *Brachypodium distachyon*. *Plant, Cell and Environment*, 41, 983-992. <https://doi.org/10.1111/pce.12889>
- Brown, P. H., Bellaloui, N., Wimmer, M. A., Bassil, E. S., Ruiz, J., Hu, H., ... Pfeiffer H., Dannel, F., & Römheld, V. (2002). Boron in plant biology. *Plant biology*, 4(02), 205-223. <https://doi.org/10.1055/s-2002-25740>
- Crisosto, C. H., Miller, A. N., Lombard, P. B. et Robbins, S. (1990). Effect of fall ethephon applications on bloom delay, flowering, and fruiting of peach and prune. *HortScience*, 25(4), 426-428. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.25.4.426>
- Dami, I. E, Beam, B. A. (2004). *Am. J. Enol. Vitic.* 55:269-275 ; DOI : 10.5344/ajev.2004.55.3.26
- Donderalp, V. Dursun, A. (2022). Improvement of frost tolerance in tomato by foliar application of potassium sulphate, *Scientia Horticulturae*, Volume 295, 10868, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110868>
- Dwyer, P. J., Bannister, P. et Jameson, P. E. (1995). Effets de trois régulateurs de croissance sur la croissance, la morphologie, les relations hydriques et la résistance au gel du citronnier (*Pittosporum eugenioides* A.Cunn). *New Zealand Journal of Botany*, 33(3), 415-424. <https://doi.org/10.1080/0028825X.1995.10412968>
- Ellena, F. ; Gonzalez, A. ; Romero, I. ; Matamala, L. ; Gavilán-CuiCui, G. ; Ruiz, A. ; Meriño-Gergichevich, C. (2024). Preventive-Glycine Betaine Treatment Mitigate Spring and Summer Chilling Damage on Young Chestnut Trees under Climate Variability in Southern Chile. 10.20944/preprints202405.0484.v1
- Griffith M., Yaish M.W.F. (2004) Antifreeze proteins in overwintering plants: a tale of two activities. *Trends Plant Sci.* 9: 399-405.
- Gupta, R. et Deswal, R. (2014) Antifreeze proteins enable plants to survive in freezing conditions. *J. Biosci.* 39 931-944] DOI 10.1007/ s12038-014-9468-2

An-Gel Sudoe

- Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. (2012) Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signal Behav.* 7 : 1456-1466.
- Karimi, R. (2017). La tolérance au gel induite par le potassium est associée aux changements endogènes de l'acide abscissique, des polyamines et des sucres solubles dans la vigne. *Scientia Horticulturae*, volume 215, pages 184-194, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.12.018>
- Karimi, R. (2019). Augmentation de la tolérance au gel de printemps dans la vigne Sultana par l'application en début de saison de sulfate de calcium et de sulfate de zinc. *Journal of Plant Nutrition*, 42(19), 2666-2681. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659343>
- Krahn, M. P. (2020). Phospholipides of the Plasma Membrane-Regulators or Consequence of Cell Polarity? *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8, 277. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00277>
- Lee S, Jeong JH, Kim SH, Shin H. (2021). Amélioration de la tolérance au gel et observation thermographique de pêchers entiers traités avec des nanocristaux de cellulose dans des conditions réalistes de gel printanier à l'aide d'un système sol-fruit-lumière du jour. *Plants* ; 10(11):2301. <https://doi.org/10.3390/plants10112301>
- Levitt, J. (1980) Responses of plants to environmental stress, 2nd Edition, Volume 1 : Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses. 497 pp. Academic Press, New York
- Loseke, B. A ; Read, P. E. ; Blankenship, E. E.(2015). Preventing spring freeze injury on grapevines using multiple applications of Amigo Oil and naphthaleneacetic acid. *Scientia Horticulturae*, Volume 193, 294-300. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.025>
- Öktem H.A., Eyidodan F., Demirba D., Bayraç A.T., Öz M.T., Özgür E., et al. (2008) Antioxidant responses of lentil to cold and drought stress. *J. Plant Biochem. Biotechnol.* 17 : 15-21.
- Ouellet, F. et Charron, J.-B. (2013). Acclimatation au froid et tolérance au gel chez les plantes. In eLS, John Wiley & Sons, Ltd. (Ed.). eLS, 7, 93. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0020093.pub2>
- Pearce, R. (2001). Congélation et dommages des plantes. *Ann. Bot.* 87 (4), 417-424. doi : 10.1006/anbo.2000.1352
- Persico, M. J. ; Smith, D. E. Centinari M. (2021). Delaying Budbreak to Reduce Freeze Damage : Seasonal Vine Performance and Wine Composition in Two *Vitis vinifera* Cultivars. *Am J Enol Vitic.* 2021 72:346-357 ; DOI : 10.5344/ajev.2021.20076
- Perry, K. B. (1998). Basics of Frost and Freeze Protection for Horticultural Crops (Principes de base de la protection contre le gel et la gelée pour les cultures horticoles). *HortTechnology horttech*, 8(1), 10-15. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.8.1.10>
- Rasmussen D.H., MacKenzie A.P. (1972) Effect of solute on ice-solution interfacial free energy ; calculation from measured homogeneous nucleation temperatures In *Water Structure at the Water-Polymer Interface*. Edité par Jellinek H.H.G. pp. 126-145, Plenum Press, New York/Londres.
- Rieger, M. (1989). Freeze protection for horticultural crops. *Horticultural Reviews*, 11, 45-109. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.8.1.10>
- Román-Figueroa, C., Bravo, L., Paneque, M., Navia, R. et Cea, M. (2021). Chemical products for crop protection against freezing stress: A review. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(3), 391-403. <https://doi.org/10.1111/jac.12489>
- Rufat, J. et Arbones, A. (2006). Applications foliaires de bore aux amandiers dans les zones sèches. *Acta Horti.* 721 : 219-225. DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.721.29
- Sadiq, M., Akram, N. A., Ashraf, M., Al-Qurainy, F. et Ahmad, P. (2019). Régulation induite par l'alpha-tocophérol de la croissance et du métabolisme des plantes dans des conditions de non-stress et de stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(4),1325-1340. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09936-7>
- S. Saadati, B. Baninasab, M. Mobli, M. Gholami (2021). Foliar application of potassium to improve the freezing tolerance of olive leaves by increasing some osmolite compounds and antioxidant

An-Gel Sudoe

- activity (Application foliaire de potassium pour améliorer la tolérance au gel des feuilles d'olivier en augmentant certains composés osmolites et l'activité antioxydante). *Sci Hortic*, 276 (2021), Article 109765.
- Snyder R.L., De Melo-Abreu J.P. (2010). Protection contre le gel : principes, pratique et économie. Volume 1. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Rome.
 - Sarikhani, H., Haghi, H., Ershadi, A., Esna-Ashari, M. et Pouya, M. (2014). L'application foliaire de sulfate de potassium améliore la résistance au froid de la vigne (*Vitis vinifera* L.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 89(2), 141-146. <https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513060>
 - Strimbeck R.G., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröder W.P., Kjellsen T.D. (2015) Extreme low temperature tolerance in woody plants. *Front. Plant Sci.* 6 : 1-15.
 - Torres, E. (2020). Applications de calcium pour l'atténuation du bitter pit chez la pomme : analyse de l'efficacité de l'application par fertigation, applications foliaires et trempages post-récolte. *Rural Life*, (487), 45-52.
 - Torres, E., Alonso, D., & Miarnau, X. (2017). Basfoliar® Frost Protect, un nouvel outil pour réduire les dommages causés par le gel chez les arbres fruitiers. *Revista De Fruticultura*, 53, 44-53. <https://quatrecbn.es/>
 - Uemura, M. ; Tominaga, Y. ; Nakagawara, C. ; Shigematsu, S. ; Minami, A. ; Kawamura, Y.(2006) Responses of the plasma membrane to low temperatures. *Physiol. Plant.* 126, 81-89.
 - Veysel, D., Atilla D. (2022). Improvement of frost tolerance in tomato by foliar application of potassium sulphate, *Scientia Horticulturae*, Volume 295, 110868, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110868>.
 - Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q. et Guo, S. (2013). The critical role of Potassium in plant stress response (Le rôle critique du potassium dans la réponse au stress des plantes). *International Journal of Molecular Science*, 14, 7370-7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>
 - Wang, H. et Dami, I. E. (2020). Evaluation of budbreak-delaying products to avoid spring frost injury in grapevines (Évaluation des produits retardant le débourrement pour éviter les dégâts causés par le gel au printemps dans les vignes). *American Journal of Enology and Viticulture*, 71(3),181-190. DOI:10.5344/ajev.2020.1907
 - Wang, H. ; Blakeslee, J. ; Jones, M. ; Chapin, L. ; Dami, I. (2020). L'acide abscissique exogène renforce les réponses physiologiques, métaboliques et transcriptionnelles d'acclimatation au froid chez les vignes cultivées en serre. *Plant Science*. 293. [10.1016/j.plantsci.2020.110437](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110437).
 - Waraich, E.A, Ahmad, R, Halim, A, & Aziz, T. (2012). Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants : a review (atténuation du stress thermique par la gestion des nutriments dans les plantes cultivées). *Journal of soil science and plant nutrition*, 12(2), 221-244. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012000200003>
 - Wilkinson S, Clephan AL, Davies WJ : Rapid low temperature-induced stomatal closure occurs in cold-tolerant *Commelina communis* leaves but not in cold-sensitive tobacco leaves, via a mechanism that involves apoplastic calcium but not abscisic acid. *Plant Physiol.* 2001; 126(4):1566-1578. doi:10.1104/pp.126.4.1566
 - Wisniewski M., Fuller M. (1999) Ice nucleation and deep supercooling in plants: new insights using infrared thermography In *Cold-Adapted Organisms : Ecology, Physiology, Enzymology and Molecular Biology*. Edité par Margesin R., Schinner F. pp. 105-118, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
 - Wisniewski M., Fuller M. I. C. K., Palta J., Carter J., Arora R. (2004). Ice nucleation, propagation, and deep supercooling in woody plants. *J. Crop Improvement* 10 (1-2), 5-16. doi : 10.1300/J411v10n01_02.
 - Wölfel, D. et Noga, G. (1998). L'effet de l'α-tocophérol et du glycérol sur la prévention des lésions dues à la congélation des fleurs. *Acta Horticulturae* 466, 95-102.

- <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.466.16>
- Zachariassen K.E., Kristiansen E. (2000) Ice nucleation and antinucleation in nature. *Cryobiology* 41 : 257-279.

F. Aspects sociaux de la lutte contre le gel

Les gelées, les mesures adoptées pour les combattre et leurs effets sur la production et la qualité des cultures touchées ont un impact social important à la fois sur les producteurs touchés et sur la société qui vit avec eux, mais sans avoir de lien direct avec la production agricole.

Le point de vue des producteurs sur la gestion des risques de gel et leur utilisation des défenses est important dans la production agricole et dans la garantie de la production de certaines cultures dans le temps, ainsi que dans leur développement et leur durabilité à long terme.

D'autre part, compte tenu du fait que la population active consacrée à la production agricole est de moins en moins nombreuse (en Catalogne, elle dépasse à peine 1 % de la population active totale) et représente un pourcentage de plus en plus faible de l'économie, la réponse sociale des personnes non liées à l'agriculture dans les aspects liés à l'apparition du gel et aux mécanismes de défense contre celui-ci, peut conditionner de plus en plus son application.

La présence de fumées ou de particules provenant d'une mauvaise combustion des produits brûlés pour réchauffer les parcelles, le bruit généré par les tours de ventilation ou la concurrence entre l'utilisation de l'eau pour la protection des cultures et d'autres utilisations peuvent conditionner la possibilité d'utiliser des systèmes de protection et, dans certains cas, compromettre la viabilité de certaines cultures ou variétés dans certaines régions.

En ce sens, dans les différentes régions où le projet est mis en œuvre, une évaluation a été faite des facteurs de conditionnement social et des réactions qui se produisent en relation avec le gel et son contrôle.

F.1. Espagne

Les gelées et les mesures adaptées pour les combattre ont une application dans le secteur agricole et dans la production agricole dans certaines régions. Cependant, ce domaine agricole s'inscrit dans des contextes beaucoup plus urbains où la relation avec la production agricole et ses mécanismes est totalement inconnue.

Cette situation conditionne les aspects sociaux de la lutte contre le gel et conduit à certaines situations spécifiques :

- Le problème du gel n'est pas connu du grand public en dehors de l'agriculture, si ce n'est par les médias.
- Il y a également une méconnaissance de la nécessité d'utiliser des moyens de défense pour atténuer les effets dramatiques qu'ils peuvent avoir sur les cultures.
- Dans l'utilisation des dispositifs de protection contre le gel, les conflits ne surviennent que lorsqu'ils causent une nuisance au public, comme la présence de fumée ou le bruit causé par les ventilateurs.
- En Espagne, l'irrigation est une technique traditionnelle dans de nombreuses régions au climat aride et, en général, son utilisation est considérée comme nécessaire pour obtenir de bons rendements. Ces dernières années, à la suite d'épisodes de sécheresse et de pénurie d'eau, les zones urbaines ont commencé à remettre en question le pourcentage élevé d'utilisation de l'eau par l'agriculture (jusqu'à 80 %) par rapport à d'autres activités. Cependant, jusqu'à présent, l'utilisation de l'eau dans la lutte contre le gel n'a fait l'objet d'aucune protestation sociale, car aux périodes où elle est utilisée (printemps), les réserves sont généralement suffisantes pour qu'elle n'entre pas en concurrence avec d'autres usages. De plus, son utilisation ne génère pas d'impact gênant sur les zones voisines.

F.1.1. Pays Basque

Au Pays basque, les cultures sensibles aux effets du gel (raisin de cuve) sont concentrées dans des zones très spécifiques, notamment dans la Rioja Alavesa, où l'on produit du raisin de cuve pour la célèbre appellation d'origine Rioja.

Malgré la valeur significative de la production, la grande majorité des producteurs n'utilise pas actuellement de systèmes actifs de lutte contre le gel sur les vignes.

Cette région a un caractère éminemment rural et la production de vin est à la base de l'économie locale. Dans ce contexte, la protection contre le gel est connue, acceptée et suscite très peu de réactions sociales parmi les personnes qui ne sont pas directement liées à la production agricole.

F.1.2. Région de Murcie

La production de fruits et légumes primeurs dans la région de Murcie est l'une des principales activités agricoles et a fait de la région un point de référence pour l'exportation de ces produits. La valeur élevée de ces produits signifie que la protection contre le gel est une activité importante pour maintenir la production au fil des ans.

L'un des systèmes traditionnellement utilisés pour lutter contre le gel dans la Vega de Murcia est l'incinération de divers produits afin d'augmenter la température des plantations à risque. L'incinération de substances pour lutter contre le gel dans la Vega de Murcia a un impact significatif sur la qualité de l'air dans les villes proches des grandes zones fruitières telles que Cieza, Abarán et Molina de Segura. ¹⁹Cette situation affecte à la fois la santé publique et l'environnement des populations les plus proches des zones de production et génère parfois des controverses à caractère social. La mise en œuvre de meilleures pratiques agricoles et l'adoption de technologies propres sont essentielles pour atténuer les effets négatifs sur les populations environnantes.

L'incinération de substances antigel peut avoir des conséquences sur la santé humaine de la population environnante en raison de.

- Problèmes respiratoires: Les particules et les gaz toxiques peuvent aggraver des maladies telles que l'asthme, la bronchite chronique et d'autres troubles respiratoires.
- Maladies cardiovasculaires: l'exposition prolongée à ces polluants a été associée à un risque accru d'infarctus et d'autres maladies cardiaques.
- Irritation des yeux et de la gorge: Les gaz tels que le SO₂ et le NO₂ peuvent provoquer une irritation des muqueuses.

Dans la région de Murcie, le contrôle des émissions polluantes et la protection de la qualité de l'air sont régis par diverses réglementations et législations aux niveaux européen, national et régional. Les principales réglementations applicables sont les suivantes :

- **Directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe :**
- **Directive 2016/2284/UE** relative à la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques (NEC) :

¹⁹ Journal La Verdad 17 juin 2016 : <https://www.laverdad.es/nuestra-tierra/medio-ambiente/201404/01/nubes-de-humo-contra-las-heladas-y-la-salud.html>

An-Gel Sudoe

- **Loi 34/2007**, du 15 novembre, sur la qualité de l'air et la protection atmosphérique :
- **Décret royal 102/2011**, du 28 janvier, sur l'amélioration de la qualité de l'air :
- **Décret royal 815/2013**, du 18 octobre, approuvant le règlement sur les émissions industrielles et le développement de la loi 16/2002, du 1er juillet, sur la prévention et le contrôle intégrés de la pollution :

Au niveau des réglementations régionales de la région de Murcie, il existe plusieurs dispositions relatives à la présence de fumées polluantes.

- **Loi 4/2009**, du 14 mai, sur la protection intégrée de l'environnement :
- **Plan d'amélioration de la qualité de l'air pour la région de Murcie** :
- **Décret 24/2010**, du 23 avril, approuvant le Plan régional de prévention et de contrôle de la pollution atmosphérique :

Ces règlements impliquent la mise en œuvre de mesures spécifiques et de sanctions en cas de non-respect :

- Autorisations environnementales : les activités agricoles impliquant l'incinération de déchets doivent disposer des autorisations nécessaires pour réglementer leurs émissions et leurs mesures de contrôle.
- Plans d'action locaux : les municipalités de la région de Murcie peuvent élaborer des plans d'action locaux pour lutter contre la pollution atmosphérique, conformément aux réglementations régionales et nationales.
- Sanctions : Le non-respect des règlements peut entraîner des sanctions administratives, notamment des amendes et l'obligation de prendre des mesures correctives.

F.1.3. Lleida

Lleida est la capitale de la région la plus agricole de Catalogne. L'économie de cette région dépend en grande partie de la production agroalimentaire, y compris la production agricole et animale et l'industrie de transformation liée à ces activités.

Lleida est connue dans le monde entier pour ses fruits, qui occupent quelque 34 000 hectares, soit environ 82 % de la superficie totale des cultures fruitières catalanes, et constituent une référence en matière de cultures fruitières dans l'ensemble de l'Espagne.

La protection contre le gel de ces cultures a toujours été une préoccupation des producteurs et de tous les acteurs de la chaîne de production qui ont besoin d'une production élevée et continue de produits (fournisseurs d'intrants, usines d'emballage, etc.) afin de maintenir leur activité.

Cette préoccupation a été renforcée à la suite de deux épisodes de gel importants en 2021, 2022 et 2024 (section C.1.3.1). C.1.3 à la page 47). Cela a entraîné une augmentation des investissements dans les systèmes de défense active, en particulier **dans les installations d'arrosage et de micro-aspersion** (dans les zones où l'eau est disponible). Les tours à vent sont utilisées dans une moindre mesure et, enfin, les bougies ou les chaufferettes sont utilisées sur des parcelles très spécifiques. Il ne fait aucun doute que la prise de conscience de la nécessité de se protéger le plus possible contre le gel s'est accrue au cours des dernières années.

D'un point de vue social, on peut dire que Lleida maintient un lien plus étroit avec l'activité agricole que d'autres régions principalement dédiées à l'industrie ou au tourisme. Les habitants de la région entretiennent, directement ou par l'intermédiaire de proches, une certaine relation avec la culture et les questions rurales.

An-Gel Sudoe

Par conséquent, la question du gel et les méthodes de contrôle utilisées ne provoquent généralement pas de conflits sociaux au-delà de la nuisance générée par l'utilisation de systèmes produisant de la fumée à proximité des grandes villes et en particulier de la capitale provinciale.

²⁰Lleida étant une région traditionnellement irriguée, l'utilisation de l'eau pour la lutte contre le gel est pleinement acceptée et est même préconisée comme le système de lutte idéal pour remplacer les systèmes produisant de la fumée.

²⁰ Diari Segre (4-4-2022.- Ecologistes demanen prohibir les cremes contra les gelades als camps de Lleida per la "contaminació" que produeixen. https://www.segre.com/ca/comarques/220404/ecologistes-demanen-prohibir-les-cremes-contra-les-gelades-als-camps-lleida-per-contaminacio-que-produeixen_163354.html Consulté le 6 juin 2024.

F.2. France

F.2.1. Moyenne-Garonne

Quatre espèces principales sont concernées par le gel : la vigne, les pommiers, les pruniers et les kiwis. Les cultures de fruits rouges, les fruits à noyaux, les noyers, amandiers, noisetiers, châtaigner (voir ci-après) sont cultivés sur des surfaces soit plus réduites, soit traditionnellement sur des secteurs de côteaux moins gélifs mais qui ont été souvent impactés en 2021, 2022 et encore localement en 2024.

Le Tarn-et-Garonne et le Lot-et-Garonne sont traditionnellement des départements de productions de fruits à noyaux et à pépins avec un recul des pêchers et abricotiers à cause de problèmes d'asphyxie en vallée de Garonne. A la place c'est le kiwi qui, malgré les problèmes de bactériose, continue sa progression que le réchauffement climatique favorise.

La prune d'Ente, pour le pruneau d'Agen, a extrêmement souffert du gel en 2021 et 2022 surtout dans les plaines fertiles du Lot.

La vigne qui abandonne le désherbage au profit d'un enherbement permanent s'est retrouvée encore plus vulnérable à cause du démarrage plus précoce de la végétation ce qui se vérifie aussi pour les pruniers, pommiers et poiriers.

La lutte antigel par aspersion sur frondaison est restée pratiquée par les kiwiculteurs et certains producteurs de vigne et de pommiers dans des secteurs gélifs, là où l'eau est abondante.

Là où la ressource en eau est limitée, la protection par tours à vent s'est développée tout en sachant qu'il est impossible de protéger en-dessous de -3.5 à -4°C et que la zone active dépasse rarement 3 ha.

En 2021 il a été démontré sur le Secteur de Saint-Emilion que la fumée produite par la combustion de paille ou de foin humides n'apporte aucun gain de température car les particules émises sont inférieures en taille à la longueur d'onde des pertes thermiques par infra-rouge. (ACMG).

Les fortes gelées de 2021 et 2022 ont, d'une certaine manière, aidé à sélectionner les systèmes de lutte efficaces. Les commerciaux qui vendaient des poudres et autres produits supposés empêcher le gel sont moins écoutés et les systèmes de type ventilateurs chauffant horizontaux tractés ne servent que lors de petites gelées. Les moyens de chauffage proposés aux tours à vent pour accroître leur efficacité dans le cas de gelées fortes n'ont pas apporté de résultats concluants sinon du point de vue consommation excessive d'énergie fossile.

Le problème du bruit des tours à vent bipales, dont le bout des hélices dépasse le mur du son, est en voie d'être réglé, du moins atténué, par l'installation d'hélices quadri ou cinq pales. On note cependant une augmentation du coût à l'achat de telles tours qui avoisine les 60 000 € pour 3 ha ! L'utilisation du drone équipé d'une caméra thermique est en train de révolutionner la compréhension des mouvements d'air dues au brassage des tours à vent. Voici une image prise lors d'une nuit de gel par un drone sur un plan en biais à proximité d'une vigne protégée par une tripale vers Saint-Emilion (Figure 59).

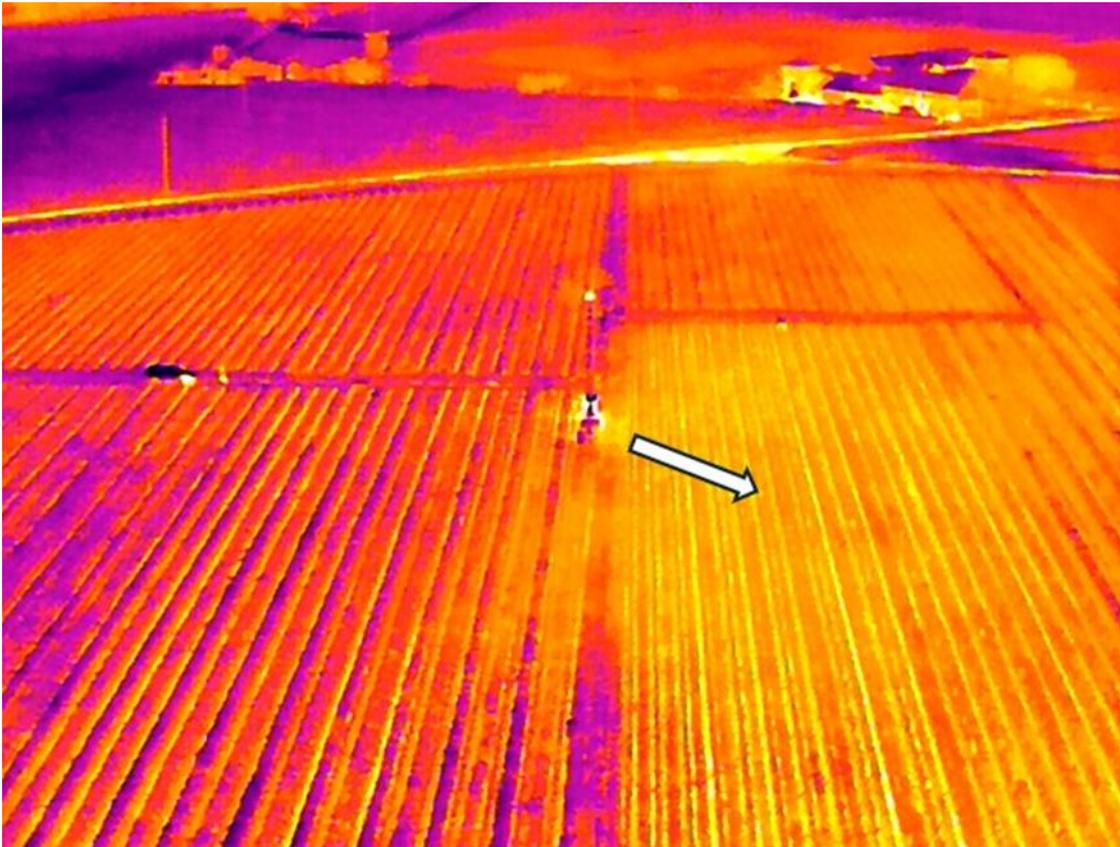


Figure 59 : Image thermique obtenue par un drone (pixel 5 cm), à son maximum d'altitude autorisé, d'une vigne protégée par une tour à vent tripale lors d'une nuit de gel de rayonnement dans le vignoble de Saint-Emilion. La rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre.

Là où le chauffage avec des chaufferettes au fuel était maintenu, des critiques des citoyens voisins poussent les producteurs à s'équiper d'autres moyens moins polluants.

Il n'y a pas de mouvements anti lutte contre le gel comme il en existe en été contre l'irrigation car les populations locales se sentent encore concernées par la réussite de la production de vins et de fruits locaux. Les services de l'état sont favorables à l'utilisation de volumes d'eau plus importants au printemps pour lutter efficacement, là où les sols le permettent, plutôt qu'aider financièrement des agriculteurs en difficulté après une gelée. Le problème demeure les débits instantanés disponibles dans l'exploitation vu que les réseaux d'amenés d'eau sont calculés pour l'irrigation estivale qui n'a besoin que de l'équivalent de 40 m³/ha et par jour alors que pour lutter contre le gel il faut ce volume/ha par heure et pendant une dizaine d'heures, soit des pompes et des tuyaux d'amenés plus gros pour faire passer quasiment dix fois plus de débit.

Les discussions sur la mise en place de solutions durables pour lutter contre les canicules estivales portent justement sur les moyens de pouvoir apporter plus de volumes d'eau instantanés dans les parcelles à protéger ou bien avec des stockages tampons et le meilleur usage des nappes alluviales. De même est remis en question le goutte à goutte, qui ne permet pas d'humidifier les sols, pour être remplacé par de systèmes d'aspersion sous frondaison à faible pression. Cela permettra d'accroître la conductivité thermique des sols juste avant une descente froide au printemps, réduisant le risque de 1 à 2°C, et de climatiser les parcelles en été (projet pilotes en cours). Voici une image thermique prise le 6/08/2024 dans l'Hérault où on voit que le verger de

pommier irrigué par aspersion est à une température de 25°C alors que la partie en goutte à goutte est à 30°C et le champ de sol nu à gauche à 40°C ! (Figura 60).

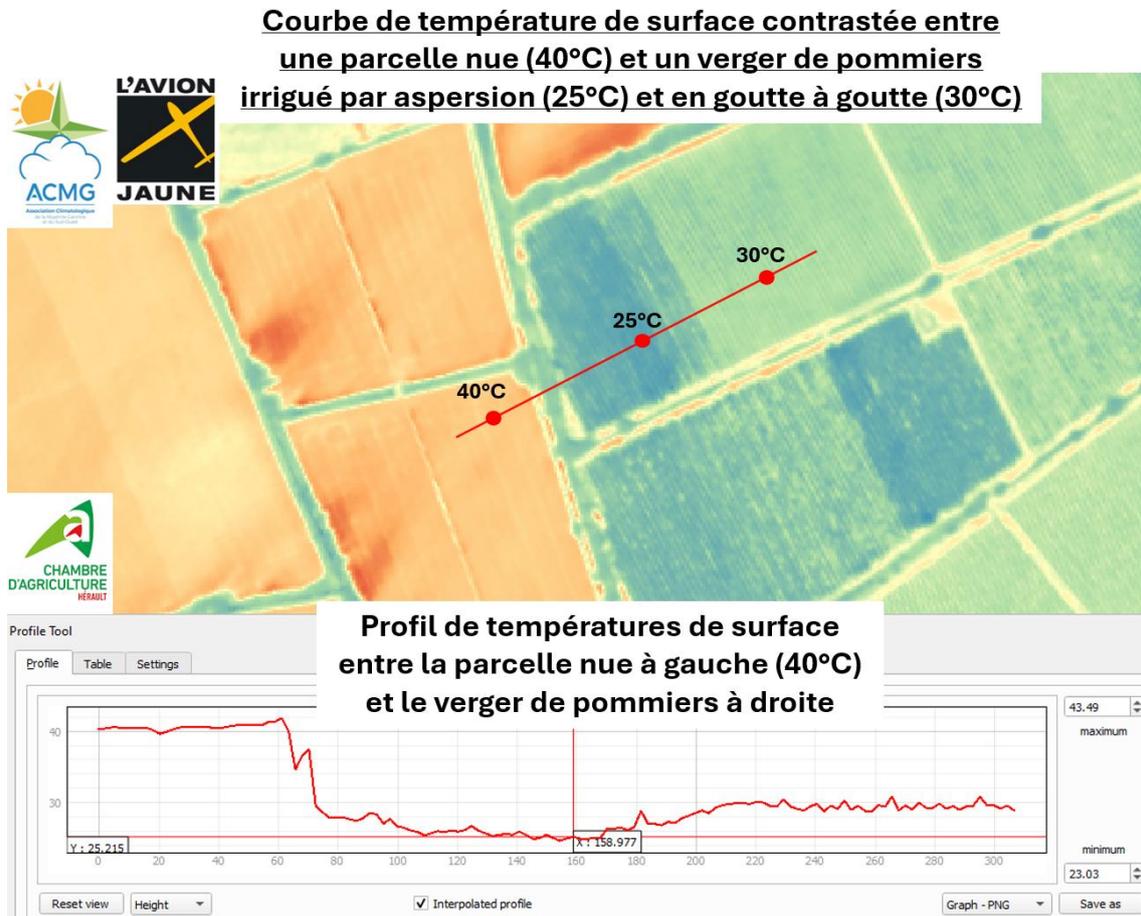


Figura 60 : Image thermique obtenue par un ULM (pixel 2 m) le 06/08/2024 dans l’Hérault vers 14h30 afin de caractériser les îlots de chaleur et de fraîcheur et constater l’effet positif de l’irrigation des vergers pour atténuer l’impact des canicules.

Le problème de la tarification du courant électrique, qui diminue à partir du 1 avril, est en discussion afin d’avoir un cout de fonctionnement acceptable dès le mois de mars mais cela entre en concurrence avec d’autres usages de l’électricité principalement d’origine nucléaire en France. Enfin l’assurance récolte ne trouve pas, pour l’instant, trop d’écho parmi les producteurs de pommes et de kiwi qui ont déjà installé des filets paragrêles ou pour des producteurs en difficulté qui trouvent les primes d’assurance trop élevées.

F.2.2. La châtaigne

Il peut être difficile de quantifier l'effet social des gelées de printemps sur les châtaigniers.
²¹Cependant, de manière empirique, les producteurs de châtaignes attribuent les pertes de

²¹ -Mouravy, M. 2021. Le gel sur châtaignier - Sensibilités, physiologie et variétés. La journée de la châtaigne, Mazeyrolles, France (comm. pers.).

récolte dans 70 % des cas aux mauvaises conditions météorologiques pendant la floraison, dans 25 % des cas aux températures défavorables à l'émergence des fleurs femelles et dans 5 % des cas aux gelées de printemps.

Dans le sud-ouest de la France, les producteurs se limitent actuellement à observer l'impact des gelées lorsqu'elles surviennent. Leur principale préoccupation est de savoir comment concilier leur budget annuel (comment payer les charges) avec une baisse de production due au gel. Ils s'interrogent également sur l'effet du gel sur l'arrêt de la sève, le retard de végétation et l'affaiblissement des arbres, qui ne peuvent être observés directement après le gel et qui peuvent contribuer à une perte de rendement.

Les producteurs de châtaignes sont souvent des agriculteurs qui pratiquent la polyculture. La protection de la culture de la châtaigne passe parfois après la gestion des autres cultures de l'exploitation, et c'est au moment de la récolte que les conséquences de l'année (climatiques et sanitaires) sont évaluées, avec une certaine passivité face à une "bonne" ou une "mauvaise" année.

Une des questions est de savoir comment identifier les leviers pour 1) sensibiliser aux risques du gel printanier et 2) impliquer les agriculteurs dans la protection contre le gel.

F.3. Portugal

Au Portugal, bien que les gelées de printemps soient très fréquentes dans certaines régions, notamment à l'intérieur du pays et en particulier dans le nord-est, où la production de fruits revêt une importance économique et sociale considérable, l'utilisation de méthodes actives de protection contre le gel est négligeable et limitée à quelques producteurs. En ce sens, l'apparition du gel est considérée par la plupart des producteurs comme un phénomène naturel et une fatalité pour laquelle peu ou rien ne peut être fait pour prévenir les dommages. Par conséquent, les méthodes de protection contre le gel n'ont pas d'aspects sociaux ou économiques pertinents. Les principaux aspects qui peuvent être mentionnés sont liés aux pertes et à leurs conséquences pour la durabilité économique des producteurs et des coopératives et entreprises du secteur. L'assurance récolte minimise ces impacts, mais elle n'est pas suffisante pour garantir la durabilité de l'activité agricole à moyen et long terme. La réduction de la production affecte l'activité des coopératives et des entreprises du secteur, générant des problèmes sociaux liés au chômage.

G. Le rôle de l'assurance agricole dans la gestion des risques liés au gel

Dans tous les pays et régions couverts par cette étude, l'assurance agricole sous forme de couverture des dommages causés par le gel est très développée.

Les principales caractéristiques de la couverture de l'assurance agricole dans chaque zone sont décrites ci-dessous.

G.1. Espagne

Le système espagnol d'assurance agricole combinée est une référence mondiale. Il a évolué et s'est adapté à la réalité du secteur, offrant une large gamme de produits et de couvertures. L'assurance agricole en Espagne s'est révélée être un outil essentiel pour gérer les risques climatiques et maintenir l'activité agricole et d'élevage.

²²En Espagne, l'assurance agricole est régie par la loi sur l'assurance agricole combinée et son règlement, qui établit les règles et les lignes directrices de son fonctionnement dans le pays.

Certaines des questions clés liées à la législation sur l'assurance agricole en Espagne sont les suivantes :

- 1. Loi sur l'assurance agricole combinée : la loi 87/1978, promulguée le 28 décembre 1978, établit les bases de l'assurance agricole combinée. Elle a été adoptée avec l'accord des partis politiques, des organisations agricoles et des compagnies d'assurance. **Cette loi est fondamentale pour le système actuel d'assurance agricole consolidé.**
- 2) Règlement d'application de la loi sur l'assurance agricole combinée : le décret royal 2329/1979 du 14 septembre 1979 approuve le règlement d'application de la loi sur l'assurance agricole combinée. Ce règlement fournit des **détails spécifiques sur la mise en œuvre de l'assurance agricole.**
- 3. Plan combiné d'assurance agricole : le gouvernement espagnol établit des plans annuels d'assurance agricole. Ces plans définissent la couverture, les subventions et les mesures spécifiques destinées à protéger les agriculteurs et les éleveurs contre les risques climatiques, les maladies et d'autres événements défavorables. **Les plans sont régulièrement mis à jour et approuvés par un accord en Conseil des ministres.**
- 4. L'Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA) est responsable de la coordination et de la supervision du système d'assurance agricole en Espagne. **L'ENESA travaille en collaboration avec les communautés autonomes et d'autres entités pour garantir l'efficacité et la bonne mise en œuvre des politiques d'assurance agricole.**
- 5. Réassurance du système espagnol d'assurance agricole : Le système d'assurance agricole comprend une réassurance qui **partage les risques entre les compagnies d'assurance et l'État.** Cela garantit la stabilité et la durabilité du système.
- 6. Registre des assurés : il existe un **registre centralisé des assurés agricoles**, qui permet un suivi et une gestion efficaces des polices souscrites.

²² MAPA : Législation sur l'assurance agricole :

https://www.mapa.gob.es/es/enesa/legislacion/legislacion/legislacion_estatal_materia_seguros.aspx

- L'assurance agricole en Espagne est conçue pour couvrir un **large éventail de risques affectant l'agriculture et le bétail**. Les principaux risques couverts sont les suivants
 - o Adversités climatiques : gelées, pluies torrentielles, vents violents, sécheresses, grêle (dommages aux cultures et aux structures).
 - o Incendies et explosions dans les exploitations agricoles
 - o Dégâts causés par la faune : dégâts causés par les animaux sauvages, tels que les sangliers ou les cerfs, qui peuvent affecter les cultures.
 - o Accidents du travail : survenant sur l'exploitation elle-même, tels que les blessures subies par les travailleurs.

Évolution de la couverture d'assurance et perspectives d'avenir

L'évolution de l'assurance agricole en Espagne a été significative au cours des dernières années. Par exemple, la croissance de la superficie assurée en 2020 a connu une augmentation de 23 %, atteignant 7,8 millions d'hectares et le capital assuré s'est élevé à 15,2 milliards d'euros.²³ En 2023, les sinistres enregistrés par l'assurance agricole se sont élevés à 1 241 millions d'euros, dépassant de 56 % le record de 2022. Le délai moyen de paiement des sinistres a été de 26 jours pour les sinistres agricoles et de 28 jours pour les sinistres animaux. En 2023, 366 701 polices d'assurance agricole ont été souscrites en Espagne, pour une superficie assurée de 5,97 millions d'hectares et un capital assuré de 16 748 millions d'euros (Figure 61).

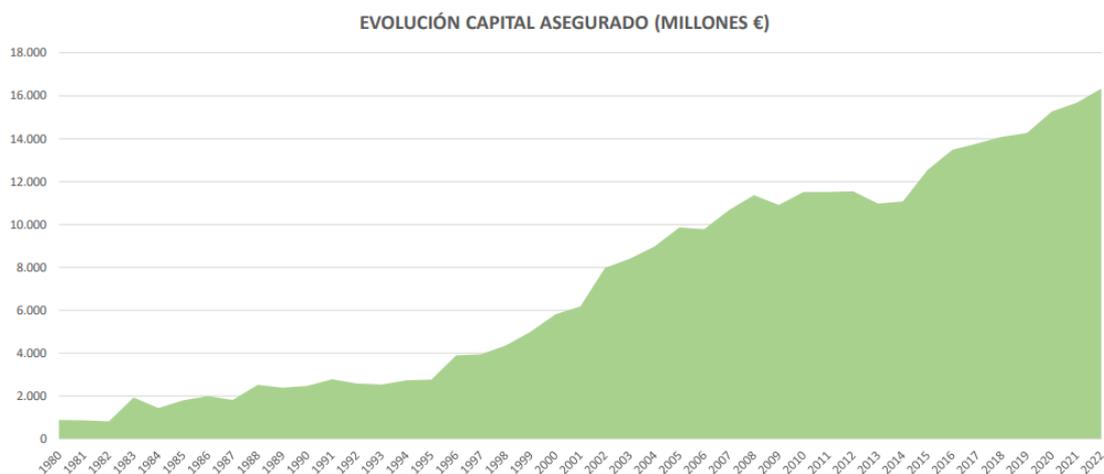


Figure 61 : Évolution des capitaux assurés en Espagne. Source : Miguel Pérez Cimas (ENESA).

Le **45e plan d'assurance** agricole d'ENESA pour 2024 souligne l'importance de l'assurance agricole dans le contexte des événements météorologiques défavorables, qui a conduit à une augmentation significative de l'indemnisation reçue par les assurés, dépassant 1 180 millions d'euros en raison de la fréquence et de l'intensité des phénomènes naturels défavorables. Il est également nécessaire de mettre en œuvre des mesures sélectives pour garantir la durabilité du

²³ Le système espagnol d'assurance agricole <https://www.agroseguro.es>.

système d'assurance sans affecter la majorité des assurés, en recherchant une utilisation plus efficace des ressources publiques. Voici quelques-unes de ces mesures :

- Soutien aux groupes prioritaires : Le nouveau plan privilégie le soutien aux jeunes agriculteurs, aux professionnels et aux exploitations prioritaires, en offrant des subventions supplémentaires pour promouvoir l'adaptation au changement climatique et la résilience du secteur.
- Soutien et subventions : L'augmentation progressive de l'allocation budgétaire pour subventionner la passation de contrats est signalée, atteignant 284,5 millions d'euros en 2024.
- Sélection des risques : des critères plus sélectifs ont été appliqués pour garantir une utilisation efficace des ressources. Il s'agit d'évaluer soigneusement les risques et d'adapter la couverture aux besoins spécifiques de chaque secteur agricole.

Ces mesures visent à concilier la protection des agriculteurs et des éleveurs avec la viabilité financière du système d'assurance agricole en Espagne.

G.2. France

L'assurance agricole en France joue un rôle crucial dans la gestion du risque de gel dans la région Nouvelle-Aquitaine, l'une des principales régions agricoles de France. Voici un résumé des aspects pertinents du rôle du système d'assurance agricole dans la région :

- **Législation et organisation du système d'assurance agricole** : En France, l'assurance agricole est principalement régie par le Code rural et de la pêche maritime. Les réglementations spécifiques peuvent varier légèrement d'une région à l'autre, mais elles sont généralement supervisées par des organismes tels que FranceAgriMer et les compagnies d'assurance agricole privées.
- **Évolution de la couverture d'assurance** : au fil du temps, la couverture d'assurance agricole a évolué pour inclure un éventail plus large de risques, y compris les dommages causés par le gel. Les polices peuvent désormais être adaptées pour couvrir les pertes de récoltes et les dommages causés par des conditions météorologiques extrêmes, telles que le gel.
- **Niveau de souscription des agriculteurs et évolution** : Le niveau de souscription à l'assurance agricole en Nouvelle-Aquitaine varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la sensibilisation des agriculteurs, les incitations gouvernementales et la gravité des risques météorologiques. Au fil des ans, les efforts visant à promouvoir l'utilisation de l'assurance agricole se sont intensifiés, mais la souscription peut encore varier en fonction des sous-secteurs agricoles et des préférences individuelles des agriculteurs.

A noter que l'assurance récolte est obligatoire pour les pomiculteurs limousins depuis 2024. L'assurance couvre la totalité de la surface de l'exploitation, quelle que soit l'espèce. Par conséquent, les pomiculteurs qui possèdent également une châtaigneraie voient leur production assurée.

Ceux qui ne cultivent que des châtaigniers ne souscrivent pas ou peu d'assurances, car elles sont trop chères par rapport aux avantages qu'elles procurent.

Depuis la réforme de l'assurance récolte - Calamité agricole en 2022, les producteurs qui ne cotisent pas à un régime d'assurance ne peuvent pas bénéficier d'une indemnisation de la préfecture au titre des calamités agricoles.

Avantages des régimes d'assurance agricole :

- **Stabilité financière** : l'assurance agricole offre une protection financière aux agriculteurs en cas de mauvaises récoltes dues à des événements imprévus tels que le gel, ce qui contribue à maintenir leur stabilité financière.
- **Gestion des risques** : permet aux agriculteurs de mieux gérer les risques liés aux conditions météorologiques et aux autres catastrophes naturelles, réduisant ainsi l'impact financier des pertes de récoltes.
- **Soutenir la production alimentaire** : En assurant les agriculteurs contre les risques, l'assurance agricole contribue à maintenir la production alimentaire, qui est cruciale pour la sécurité alimentaire de la région.

Inconvénients des régimes d'assurance agricole :

- **Coûts** : Les primes d'assurance peuvent être onéreuses pour certains agriculteurs, en particulier ceux qui exercent leur activité dans des zones à haut risque ou qui produisent des cultures sensibles aux conditions météorologiques.
- **Limites de la couverture** : certains événements extrêmes ou risques spécifiques peuvent ne pas être couverts par les polices d'assurance agricole standard, ce qui expose certains agriculteurs à des pertes financières importantes en cas de catastrophe.
- **Complexité administrative** : la souscription d'une assurance agricole peut être complexe et exigeante en termes de paperasserie, ce qui peut dissuader certains agriculteurs de s'engager dans le processus.

En résumé, l'assurance agricole dans la région Nouvelle-Aquitaine, et dans toutes les régions de France, joue un rôle essentiel dans la gestion du gel et des autres risques liés à l'agriculture. Bien qu'elle offre des avantages significatifs en termes de protection financière et de gestion des risques, elle présente également des inconvénients tels que des coûts élevés et une complexité administrative. Son utilisation et son efficacité dépendent de plusieurs facteurs, tels que la réglementation, la sensibilisation des agriculteurs et les incitations des pouvoirs publics.

G.3. Portugal

Au Portugal, la réglementation de l'assurance agricole repose sur divers décrets et arrêtés ministériels :

- ²⁴Le décret-loi n° 162/2015 du 14 août 2015 a établi le système d'assurance agricole (SSA), qui se caractérise par l'octroi d'une aide à la souscription d'une assurance agricole.
- ²⁵L'arrêté ministériel n° 65/2014 du 12 mars 2014 a publié le règlement sur l'assurance récolte et l'indemnisation des pertes, qui a déjà été modifié par les arrêtés ministériels n° 132/2017 du 10 avril, n° 109/2018 du 23 avril, n° 61/2020 du 5 mars et n° 59/2021 du 16 mars, ainsi que par l'arrêté ministériel n° 28/2023 du 12 janvier.
- L'arrêté ministériel 4585/2018 détermine les taux de référence pour le calcul de l'aide prévue par le règlement sur l'assurance récolte et la compensation des pertes.

Au Portugal, le ministère de l'agriculture, par l'intermédiaire de l'Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas, I.P - IFAP, **subventionne les primes d'assurance jusqu'à un maximum de 70%**, afin de réduire la charge pesant sur les agriculteurs. Cette aide est subventionnée par l'Union européenne et favorise particulièrement les jeunes agriculteurs et ceux qui ont le statut d'agriculteur familial.

L'objectif de l'assurance récolte est d'assurer la production en garantissant aux agriculteurs une indemnisation en cas d'événement climatique. L'assurance récolte se divise en deux types :

1. Assurance horizontale
2. Assurance spéciale en fonction du type de culture et de sa localisation : a) assurance spéciale pour les grenades dans l'intérieur du Nord ; b) assurance spéciale pour les tomates industrielles ; c) assurance spéciale pour les agrumes dans l'Algarve Barrocal ; d) assurance spéciale pour les cerises ; e) assurance spéciale pour les poires Rocha dans l'Ouest.

Le risque de gel est inclus dans les deux types d'assurance, avec une franchise absolue de 15 % ou 25 %, et la période de départ, dans le cas des arbres fruitiers, dépend de l'état phénologique des cultures. ²⁶Ces informations sont disponibles sur le site de l'IFAP.

Souscrire une assurance

L'assurance récolte peut-être souscrite individuellement ou collectivement (par l'intermédiaire de groupements, d'organisations ou d'associations de producteurs reconnus).

L'agriculteur est tenu d'assurer toutes les parcelles/sous-parcelles de chaque culture assurée qu'il possède, à condition qu'elles fassent partie de la même unité de production.

Le rendement moyen de la culture assurée peut être basé soit sur la table de référence établie par le Bureau de la planification, de la politique et de l'administration générale (GPP), soit sur la

²⁴ Décret-loi n° 162/2015 du ministère de l'Agriculture et de la Mer (2015). Journal officiel de l'État, 1ère série - n° 158 - 14 août 2015.

²⁵ Arrêté n° 65/2014 du Ministère des Finances et de l'Agriculture et de la Mer (2014). Réglementation de l'assurance récolte et de l'indemnisation des pertes. Journal officiel de l'État, 1ère série - n° 50 - 12 mars 2014.

²⁶ IFAP (2024). Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas, I.P. <https://www.ifap.pt/> (consulté le 1er juillet 2024).

valeur moyenne de productivité obtenue au cours des trois dernières années, si l'agriculteur dispose de son propre registre.

En cas de sinistre, l'octroi de l'indemnité est subordonné à la condition que chaque assuré subisse des pertes cumulées supérieures à 20 % de la production annuelle moyenne de la culture assurée.

Le calcul de l'indemnité est basé sur la production réelle avec une limite à la production assurée. Des franchises variables de 15 à 25 % sont appliquées en fonction du type d'assurance.

Évolution de la couverture d'assurance et perspectives d'avenir

Le système d'assurance récolte du Portugal prévoit un mécanisme de compensation des pertes, le public ayant reconnu que les assureurs n'ont pas été en mesure de répartir le risque sur le marché international de la réassurance à des coûts appropriés pour ce type de police et que la suppression de ce mécanisme, dans ces circonstances, pourrait rendre la souscription d'une assurance plus difficile pour les agriculteurs, soit en raison d'une réduction de l'offre du produit, soit en raison d'une augmentation des coûts.

Pour réduire la charge des agriculteurs, le gouvernement et le ministère de l'agriculture soutiennent les primes d'assurance, qui peuvent varier de 57 % à un maximum de 70 %. Ces subventions favorisent l'agriculture familiale et les jeunes agriculteurs. Les différents types d'assurance (assurance horizontale et assurance spéciale pour différentes cultures et régions) ont permis d'adapter le système d'assurance au niveau de risque associé aux différentes cultures et régions.

Le capital assuré a augmenté de manière significative ces dernières années. En 2014, le capital assuré était de 163 millions d'euros et en 2022 (dernière année avec statistiques), le chiffre était de 423 millions d'euros, avec un niveau de soutien atteignant 13,5 millions d'euros (IFAP, 2024).

En raison du caractère aléatoire du climat actuel et de l'augmentation attendue de la fréquence des événements extrêmes dans le contexte du changement climatique, l'existence d'un système d'assurance agricole est essentielle pour garantir la durabilité du secteur agricole et éviter l'abandon de son activité, en particulier dans les régions intérieures déjà fortement touchées par le dépeuplement.

H. Conclusions et visions pour l'avenir des problèmes liés au gel

Après avoir passé en revue les différents aspects liés à l'incidence du gel sur les cultures et les méthodes de défense disponibles, il est possible de tirer quelques conclusions et réflexions sur la situation actuelle, l'évolution et les aspects les plus pertinents qui devraient être pris en compte dans la gestion future de ces événements.

Malgré l'augmentation globale des températures, le risque de gelées printanières semble susceptible d'augmenter et les dommages qui y sont associés peuvent être importants. La combinaison de températures hivernales plus douces qui modifieront la phénologie des cultures, en avançant l'apparition des stades les plus sensibles, et d'épisodes sporadiques mais intenses d'invasion d'air polaire, peut accroître les pertes économiques dans les cultures.

H.1. Espagne

Les méthodes de défense passive deviendront de plus en plus importantes car elles constituent le moyen le plus efficace et le plus économique de prévenir et de contrôler le gel.

Les moyens de défense passifs axés sur la **connaissance du microclimat** au niveau des parcelles de production, ainsi que les études de risque **actualisées**, seront fondamentaux pour la prise de décisions concernant les nouvelles plantations. En ce sens, les récents travaux réalisés en Murcie dans ce but peuvent servir d'exemple à suivre dans d'autres zones de production espagnoles.

De même, l'étude de l'impact au niveau local d'autres **techniques de défense passive peu coûteuses et faciles à appliquer** (élagage tardif, gestion du sol et de la couverture végétale, gestion de l'irrigation le cas échéant) devrait être une priorité.

De même, l'effet sur le gel et l'utilisation optimale des structures de protection des cultures telles que les couvertures en plastique, les couvertures thermiques ou les filets de protection contre la grêle sont également intéressants.

Dans cette optique, l'une des activités du projet An-Gel Sudoe est l'étude de la **taille tardive appliquée** aux vignobles du Pays basque et de l'effet sur le bilan thermique des parcelles avec différentes installations et systèmes de gestion (systèmes de protection combinées à la gestion de la couverture végétale et de la teneur en eau du sol).

L'utilisation de nouveaux outils de télédétection (capteurs thermiques installés sur différents types de plates-formes aériennes) permettra de mieux comprendre les différences microclimatiques et l'impact des systèmes de gestion des parcelles agricoles sur le comportement thermique. Ces connaissances permettront d'améliorer les choix culturaux et les actions en cas de gelées futures. Le projet An-Gel Sudoe développera également ce type de mesures sur de grandes surfaces dans différentes zones de production.

Le système de protection basé sur l'**application d'eau sur les plantes par aspersion** ou micro-aspersion est celui qui permet le plus grand degré de couverture dans les différentes conditions climatiques dans lesquelles le gel peut se produire. Cependant, son utilisation présente des limites, notamment en termes de disponibilité de l'eau. Dans un contexte de pénurie et de pression sociale pour réduire la consommation et augmenter l'efficacité, l'utilisation de nouveaux systèmes d'application de l'eau (micro-pulvérisation pulsée à faible volume et micro-pulvérisation localisée) sera essentielle. Pour ce faire, il est nécessaire d'expérimenter ces systèmes afin de déterminer leur comportement et leurs limites et d'optimiser la conception et la gestion des installations. Dans ce sens, dans le cadre du projet An-Gel Sudoe, plusieurs parcelles pilotes seront installées avec différents systèmes de ce type afin d'accroître les connaissances à leur sujet.

Compte tenu des limites environnementales de l'utilisation des combustibles fossiles dans les systèmes d'approvisionnement en chaleur, il sera nécessaire d'accroître les connaissances sur l'utilisation des systèmes à base de biomasse et sur la combinaison de divers systèmes tels que les ventilateurs et les chauffages, afin d'obtenir une efficacité maximale avec une consommation minimale de carburant.

Compte tenu de l'apparition continue de **produits chimiques** ayant différents systèmes d'action et dont l'argument de vente est la protection contre le gel, il serait hautement souhaitable d'effectuer des tests d'efficacité contrôlés afin de valider leur efficacité réelle.

Selon les prévisions et l'évolution des sinistres au cours des dernières années, les dommages aux cultures sont susceptibles d'augmenter, avec les pertes économiques et les indemnités qui en découlent. Compte tenu de cette situation, l'assurance agricole devrait jouer un rôle de plus en plus important dans la couverture de ces risques. On s'attend également à ce que les assureurs agissent pour limiter les surfaces et les montants assurables par les agriculteurs, augmentant ainsi le niveau de non-protection et le risque de survie de nombreuses exploitations.

De même, une plus grande prise de conscience sociale des effets du gel sera nécessaire, non seulement pour le producteur mais aussi pour le consommateur sous la forme de pénuries sur le marché et d'augmentations de prix, ce qui devrait conduire à une plus grande implication des administrations à la fois pour soutenir l'étude du gel et pour couvrir les dommages catastrophiques potentiels qui en découlent.

H.2. Portugal

Les principales conclusions et les perspectives d'avenir concernant le problème du gel au Portugal peuvent être résumées dans les points suivants.

L'apparition du gel dans une région donnée, bien que fortement déterminée par les conditions synoptiques, varie en fonction des conditions topographiques, de l'existence d'obstacles au drainage de l'air froid et des conditions à l'échelle de la parcelle qui déterminent le bilan énergétique et le refroidissement nocturne des surfaces qui en découle. À cet égard, le développement de modèles régionaux et locaux de prévision des risques de gel associés à des systèmes d'alerte est essentiel pour l'activation en temps utile de méthodes actives de protection contre le gel.

Le choix des méthodes de protection contre le gel les plus appropriées pour une culture dépend du contexte agro-météorologique et des pratiques culturales utilisées. À cet égard, il est fondamental de mener des études de recherche et de développement dans les régions et les cultures agricoles les plus touchées par le gel. Les projets de recherche devraient inclure des lignes sur le type de gel et sa méso et micro-météorologie (prévision des températures minimales au niveau local et régional, étude des inversions thermiques, etc.) et l'évaluation de différentes méthodes actives et passives, y compris l'évaluation économique. Le transfert de connaissances aux décideurs, aux techniciens des associations d'agriculteurs et de producteurs et aux acteurs du secteur agricole en général est crucial pour l'application future des méthodes de protection contre le gel.

L'assurance récolte joue un rôle important pour garantir la stabilité financière des producteurs et des entreprises en cas de pertes importantes causées par le gel et d'autres événements extrêmes tels que la grêle. Toutefois, le montant élevé des primes représente une lourde charge financière, en particulier pour les petits producteurs, et c'est la raison pour laquelle beaucoup d'entre eux ne souscrivent pas d'assurance. À l'avenir, il conviendrait d'envisager des mesures visant à réduire le montant des primes d'assurance que les producteurs doivent payer s'ils utilisent des méthodes de lutte contre le gel ou d'autres phénomènes extrêmes. De telles mesures, en plus de réduire la charge financière des paiements d'assurance, permettraient d'encourager l'adoption de méthodes de lutte contre le gel et de minimiser ainsi les pertes de productivité en cas de gel.

H.3. France

En France, deux zones sont concernées par ce projet : la zone de production de châtaignes de la région Nouvelle-Aquitaine, (notamment dans le département de la Dordogne) et la région Moyenne-Garonne et le Sud-Est, où les principales cultures habituellement touchées par le gel sont les arbres fruitiers (principalement les pruniers et les pommiers) et la vigne.

Dans le cas du châtaignier, l'augmentation des températures moyennes hivernales provoque une pousse précoce des arbres dans les plantations du sud-ouest, ce qui les rend plus vulnérables aux gelées printanières. Pour l'instant, les producteurs se contentent d'observer l'impact du gel sur leurs exploitations. Cependant, les effets du gel sur les rendements en fin de saison sont de plus en plus importants. Il est donc nécessaire de développer des systèmes d'alerte et des stratégies efficaces pour minimiser l'impact de ces gelées sur les vergers de châtaigniers.

L'**amélioration des modèles de prévision météorologique** et des systèmes d'alerte au gel répartis dans la région de culture (stations pilotes), coordonnée avec les alertes via les bulletins phytosanitaires et les bulletins techniques émis par les professionnels de la châtaigne, permettrait aux producteurs de mieux anticiper et planifier la mise en œuvre des stratégies de protection contre le gel. Les stratégies actuellement applicables à la culture du châtaignier sont principalement passives. La stratégie active visant à augmenter la température radiative du sol en maintenant la réserve hydrique des 15 à 20 premiers cm du sol proche de la capacité au champ, en évitant la saturation, pendant la période critique des gelées de printemps semble être une approche prometteuse. Elle doit cependant être adaptée à la physiologie du châtaignier, qui ne tolère pas l'excès d'humidité ni les sols mal drainés.

Les températures critiques pour les différents stades phénologiques du châtaignier sont bien connues. Cependant, il est encore difficile de quantifier l'effet des gelées de printemps sur ces stades. La compréhension des mécanismes de développement physiologique des différentes variétés et de l'influence de la température sur le développement des fleurs permettrait de créer des modèles intégrant à la fois des données physiologiques et climatiques afin d'optimiser les stratégies de défense contre le gel. Il serait également nécessaire d'évaluer l'impact environnemental de l'utilisation du système d'irrigation en hiver pour la protection contre le gel, afin d'optimiser les ressources en eau pour les périodes où il n'y a pas de précipitations en été.

La principale préoccupation des producteurs est de concilier leur budget annuel avec une baisse de production due au gel. Malgré la réforme de l'assurance récolte pour les calamités agricoles, qui entrera en vigueur en 2023, la plupart des producteurs de châtaignes du sud-ouest de la France ne souscrivent pas d'assurance récolte, car elle est encore trop chère par rapport aux avantages qu'elle offre. Dans ce contexte, il est d'autant plus important d'améliorer les systèmes de prévision et les stratégies de protection. Une approche intégrant l'innovation technologique, la recherche et le contexte économique des producteurs de châtaignes par rapport à leur système d'exploitation est donc nécessaire.

Dans le cas de la Moyenne-Garonne et du Sud-Est français, les conclusions énoncées plus haut par les partenaires espagnols et portugais sont tout à fait applicables à la zone, et nous n'allons pas les répéter, mais vous suggérer d'aller les lire ou les relire. Nous pouvons ajouter quelques éléments relatifs aux inconvénients qu'entraîne l'amélioration des sols lors de l'application des techniques de l'agriculture régénérative.

Par exemple, dans les vignobles et les vergers avec un **enherbement permanent au sol**, il a malheureusement été confirmé qu'il y a un risque de gel plus élevé, car il a été constaté que les parcelles avec de l'herbe ont une température au sol plus basse (plus de 3°C de différence) par rapport aux parcelles où toute l'herbe a été enlevée. Comment concilier la vie du sol et le risque

de gel ? Nous menons des expériences dans le cadre d'An-Gel Sudoe pour mieux comprendre l'influence de l'enherbement et de l'humidité du sol sur les bilans énergétiques et le gel. La stratégie envisagée est de mieux préserver et, si possible, d'augmenter l'humidité du sol afin qu'il agisse comme une sorte d'accumulateur de chaleur pour compenser une partie importante du flux de rayonnement pendant la nuit.

Dans le sud-ouest de la France, la disponibilité de l'eau au printemps est moins problématique que dans le bassin méditerranéen. Il s'agit plutôt d'un problème de débit instantané, car les systèmes utilisés dans les vergers calibrés pour l'irrigation ne peuvent fournir qu'entre 40 et 80 mm par jour et par hectare, tandis qu'entre 20 et 40 mm par heure et par hectare d'eau liquide doivent être transformés en glace pour se protéger contre des températures de -5°C ou -6°C . La question de la répartition efficace de cette eau sur le sol ou sur les plantes à protéger reste ouverte et remet en cause, par exemple, l'irrigation au goutte-à-goutte, moins efficace que l'aspersion pour mouiller toute la surface du sol.

En principe, lorsque l'eau ne peut être utilisée comme moyen de lutte, soit parce que les volumes disponibles sont insuffisants, soit parce que le système racinaire des cultures ne le supporte pas, le deuxième moyen de lutte, qui assure une protection jusqu'à environ -4°C , est la tour à vent. Les commerciaux proposent des tours à vent pour protéger des surfaces largement supérieures à 5 ha chacune. Cependant, lors des fortes gelées de 2021 et 2022, les surfaces protégées ont rarement dépassé 3 ha, soit environ 100 m de diamètre autour de la tour. Dans le cadre du projet An-Gel Sudoe, nous utiliserons des drones thermiques pour observer différents types de systèmes de ventilation afin de clarifier ce point. Nous espérons également obtenir un début de réponse à la question suivante : *la protection contre le gel est-elle le résultat d'un chauffage ou d'un séchage ?* Il a été démontré que la dessiccation augmente la durée de résistance au gel, qui ne dépasse pas 10 minutes lorsque les tissus sensibles sont mouillés, par exemple par la rosée, alors qu'elle peut dépasser une heure ou plus en dessous du seuil si la plante est sèche.

Comme nous sommes partenaires du projet Life FrostDefend, la question de l'influence des bactéries de congélation est suivie avec l'INRAE de Clermont-Ferrand. Cela pourrait expliquer la différence de sensibilité, car certaines bactéries actives en tant que noyaux de formation de glace facilitent le début de la congélation de la rosée à environ -2°C . Dans le cas des milieux secs, le nombre de bactéries actives étant très faible, la congélation de l'eau de surface et des tissus sous-jacents serait très limitée ou au moins retardée. Nous espérons pouvoir tirer quelques conclusions à cet égard, en tenant compte du fait que l'utilisation des antibiotiques est interdite en Europe et que les traitements au cuivre sont limités et moins efficaces sur les bactéries.

Enfin, quant aux autres solutions non validées, mais toujours présentées comme efficaces par la publicité, souvent bon marché et ayant déjà fonctionné ailleurs, les gelées de 2021 et 2022 ont apporté une réponse cinglante : elles ne fonctionnent que s'il ne gèle pas ! Bien sûr, il est tentant d'essayer des produits stimulants, des asséchants, des fumées ou des brouillards censés réduire les pertes par rayonnement, mais à quoi bon s'ils ne reposent pas sur des principes physiques connus et démontrables ?

D'ici la fin de l'année 2026, nous espérons avoir acquis plus d'expérience et de données pour compléter ce document, qui rassemble nos connaissances actuelles et propose des solutions efficaces à condition qu'elles soient mises en œuvre avec sérieux et qu'elles suivent des principes de fonctionnement bien connus.