

# INFLUENCE DU CLIMAT SUR L'EXPRESSION DES SYMPTOMES D'UNE MALADIE VASCULAIRE DE LA VIGNE

Chloé Delmas<sup>1\*</sup>, Lucas Etienne<sup>1</sup>, Thibaut Fréjaville<sup>1</sup>, Davide Martinetti<sup>2</sup>, Frédéric Fabre<sup>1</sup>, Elise Frank<sup>3</sup>, Pascal Lecomte<sup>1</sup>, Lucie Michel<sup>3</sup>, Valérie Bonnardot<sup>4</sup> & Lucia Guérin-Dubrana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRAE, ISVV, Bordeaux Sciences Agro, Santé et Agroécologie du Vignoble, 33140 Villenave d'Ornon, France

<sup>2</sup> INRAE, Biostatistiques et Processus Spatiaux, 84000 Avignon, France

<sup>3</sup> Plateforme ESV, INRAE, Biostatistiques et Processus Spatiaux, 84914 Avignon, France

<sup>4</sup> CNRS, Université Rennes 2, Littoral Environnement Télédétection Géomatique, 35045 Rennes, France  
\*chloe.delmas@inrae.fr

**Résumé.** Les interactions entre facteurs abiotiques (comme le climat) et biotiques (comme les agents pathogènes) sont à l'origine d'un processus de dépérissement impactant particulièrement les plantes pérennes dans le contexte du changement climatique. La viticulture mondiale est largement impactée par ce processus, notamment du fait de maladies du bois qui pèsent lourdement sur la longévité des vignobles. Parmi ces maladies, l'esca se distingue comme l'une des plus préoccupantes. Cette maladie vasculaire résulte d'une association complexe de divers agents fongiques et se caractérise par l'expression de symptômes foliaires. Ses déterminants sont toutefois largement méconnus. Ici, nous proposons d'étudier le rôle d'un ensemble de facteurs, notamment climatiques, sur l'incidence de l'esca, à de larges échelles spatiales et temporelles, en utilisant les outils de la modélisation statistique.

Pour étudier la dynamique intra-saisonnière de l'esca ainsi que l'incidence annuelle des symptômes en relation avec le climat en France, deux types d'approches de modélisation ont été utilisées, toutes deux reposant sur les variables climatiques de la base de données SAFRAN (Météo-France) estimées sur des mailles horizontales de 8 x 8 km. D'une part, une étude des observations de symptômes foliaires de l'esca sur 50 parcelles plantées avec 11 cépages et suivies entre 2003 et 2021 a été réalisée pour analyser l'incidence hebdomadaire et la phénologie de l'esca au fil des saisons, en utilisant un ensemble de modèles linéaires généralisés mixtes (*GLMM*) avec des approches fréquentistes. D'autre part, une étude sur 481 parcelles plantées avec 7 cépages et suivies sur la même période a permis d'explorer l'effet du climat en relation avec la phénologie de la vigne (calculs d'indicateurs écoclimatiques) sur l'incidence annuelle des symptômes, en utilisant des *GLMM* avec des approches bayésiennes reposant sur la méthode *Integrated nested Laplace approximation* (INLA). Ces approches complémentaires ont mis en évidence le rôle du climat dans l'incidence de l'esca à différents niveaux temporels (intra- et inter-annuelle).

A l'échelle intra-annuelle, nos résultats suggèrent qu'un climat plus chaud, dans les deux mois précédents l'expression, conduit à des symptômes d'esca plus précoces durant la saison, mais diminue la proportion de nouvelles vignes symptomatiques de l'esca du fait d'une sécheresse printanière accrue et d'une forte corrélation positive entre les températures au printemps et le VPD (déficit de vapeur d'eau). A l'échelle inter-annuelle, nos résultats suggèrent que le climat pendant la saison de croissance et les périodes d'expression des symptômes foliaires ont fortement influencé l'incidence annuelle de l'esca des différents cépages étudiés, en particulier la température moyenne, la disponibilité en eau du sol, l'évapotranspiration et le VPD. Ces résultats offrent des perspectives intéressantes pour mieux appréhender les interactions tripartites entre plantes, climat et maladies. Ils permettront de

mieux anticiper le risque de dépérissement dans les décennies à venir.

**Mots-clés.** Climat - épidémiologie végétale - esca – INLA – vigne – santé des plantes – modèles mixtes – SAFRAN - statistique bayésienne

**Abstract.** The decline of perennial plants due to interactions between abiotic factors, such as climate, and biotic factors, such as pathogens, is a significant issue in the context of climate change. Plant dieback is having a significant impact on wine production worldwide, particularly due to wood diseases that affect the longevity of vineyards. Esca is one of the most concerning diseases. This vascular disease involves a complex community of various fungal pathogens and is characterized by typical foliar symptoms. The factors influencing foliar symptom incidence are still poorly understood. Here, we propose to investigate the impact of various factors, including climate, on esca incidence on a large spatial and temporal scale, using statistical modelling.

To investigate the intra-seasonal dynamics of esca and the annual expression of symptoms in relation to climate in France, two modelling approaches were employed. Both approaches used climate variables from the SAFRAN (Météo France) database estimated on 8x8km horizontal grids. Firstly, a study of esca leaf symptom observations in 50 plots planted with 11 varieties and monitored between 2003 and 2021 was conducted to analyze the weekly incidence and phenology of esca over the seasons, using an ensemble of linear generalized mixed models (*GLMM*) fitted with frequentist approaches. Secondly, a study of 481 plots planted with 7 cultivars and monitored during the same period investigated the relationship between climate and vine phenology (ecoclimatic indicators) on the yearly incidence of symptoms, using *GLMM* fitted with Bayesian approaches and the method Integrated nested Laplace approximation (INLA). These complementary methods have revealed the role of climate in esca incidence at various temporal levels (intra- and inter-annual).

On an intra-annual scale, our results suggest that a warmer climate in the two months preceding expression leads to esca symptoms appearing earlier in the season, but reduces the proportion of new symptomatic vines due to increased spring drought and a strong positive correlation between spring temperatures and VPD (vapor pressure deficit). On an inter-annual scale, the climate during the growing season and leaf symptom expression periods strongly affected the annual incidence of esca of the different cultivars studied, in particular the average temperature, soil water availability, evapotranspiration, and VPD. These findings provide new insights for comprehending the relationships between plants, climate, and diseases, allowing us to anticipate the risk of vine decline in the future decades.

**Keywords.** Climate - plant epidemiology - esca - INLA - vine - plant health - mixed models - SAFRAN - Bayesian statistics

# 1. Contexte de l'étude et objectifs

## 1.1 Dépérissement du vignoble et changement climatique

Le changement climatique pourrait être favorable aux cycles biologiques de nombreux champignons pathogènes augmentant ainsi la pression qu'ils exercent sur les cultures des climats tempérés (Chaloner et al. 2021). Cependant, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses pourrait contrebalancer les effets favorables du réchauffement sur les agents pathogènes et la productivité des cultures (Torres-Ruiz et al. 2024). Par conséquent, la compréhension des relations entre les conditions climatiques, les agents pathogènes et le développement des maladies s'avère cruciale afin d'anticiper les effets du changement climatique sur la santé des cultures. Notamment, de nombreuses plantes pérennes subissent un dépérissement global causé par des facteurs biotiques, abiotiques et leurs interactions (Allen et al. 2010 ; Hammond et al. 2022).



Les maladies du bois de la vigne, en particulier l'esca, constituent actuellement l'un des défis majeurs de la viticulture, étant une des causes du dépérissement des vignobles (Gramaje et al. 2018). L'esca est une maladie complexe qui implique plusieurs champignons pathogènes pouvant entraîner la mort des vignes. L'incidence des symptômes foliaires d'esca (Figure 1) a augmenté depuis le début du 21e siècle, en partie en raison de l'abandon progressif de l'arsénite de sodium qui était jusqu'en 2001, année de son interdiction, le seul traitement chimique disponible (Bertsch et al. 2013).

Figure 1. Symptômes foliaires d'esca sur le cépage de vigne Sauvignon blanc (Villenave d'Ornon, France) ©Delmas

La variabilité des symptômes foliaires rend la maladie difficile à comprendre, avec des plantes présentant parfois des symptômes une année mais pas les suivantes (Dewasme et al. 2022). La phénologie de cette maladie (dates d'apparition des symptômes) et les variations intra- et inter-saisonnières de son expression restent peu étudiées (mais voir Lecomte et al. 2024), malgré l'importance de ces caractéristiques pour la gestion des vignobles. Les variations climatiques (journalières, saisonnières et annuelles), à plus ou moins long terme, de par leurs effets directs sur la biologie des champignons et des plantes infectées, jouent très probablement un rôle clé dans les variations d'incidence des symptômes foliaires d'esca.

L'étude du rôle des facteurs climatiques dans la santé des plantes nécessite la collecte de données d'épidémiologie à l'échelle des territoires et sur de nombreuses années. Les données d'incidence des symptômes, observés à l'échelle des plantes (Nutter et al. 2006), sont souvent complexes à modéliser chez la vigne du fait de la pluralité des facteurs en jeu (année, cépage, âge et localisation des parcelles, taille d'échantillon, méthode de sélection des parcelles suivies, pratiques culturales).

## 1.2 Objectifs

L'enjeu de ce travail est d'explorer le rôle du climat dans l'incidence de l'esca au cours des saisons de végétation et des vingt dernières années à l'échelle nationale. Pour cela deux objectifs ont été réalisés indépendamment :

(1) Étudier le rôle du climat dans l'incidence intra-saisonnière des symptômes foliaires de l'esca et la phénologie de la maladie (date où 50% de l'incidence finale de la saison est atteinte) dans un réseau de vignobles du sud de la France à l'aide d'un ensemble de modèles mixtes fréquentistes ;

(2) Étudier l'influence d'indicateurs écoclimatiques (variables climatiques calculées en fonction de la phénologie des cépages de vigne) sur l'expression des symptômes foliaires de l'esca en fin de saison (incidence annuelle) à l'aide d'une base de données de surveillance nationale et de modèles bayésiens (*Integrated nested Laplace approximation* - INLA).

## 2. Méthodologie : intégrer les données épidémiologiques et indicateurs climatiques

### 2.1 Données épidémiologiques

Pour l'objectif 1, le jeu de données « épidémiologie » consiste en des notations quasi-hebdomadaires de symptômes foliaires d'esca à l'échelle du cep de vigne réalisées dans le Sud-Ouest (voir Lecomte et al. 2024) et dans le Sud-Est de la France. Cinquante vignobles et 11 cépages ont été suivis entre 2003 et 2021. Pour chaque couple parcelle-année, l'incidence de l'esca, correspondant à la proportion de ceps de vigne nouvellement symptomatiques par date de notation et par site, a été estimée par semaine ainsi que la date à laquelle 50% de l'incidence finale cumulée était atteinte.

Pour l'objectif 2, le jeu de données utilisé est issu de la surveillance nationale des vignobles (observatoire maladies du bois). Ces données d'observation ont été regroupées et homogénéisées pour constituer un unique set de données (projet CLIMESCA) hébergé dans le système d'information de la Plateforme d'Épidémiosurveillance en Santé Végétale. Les données présentées ici regroupent les incidences annuelles (proportion de ceps de vigne symptomatiques au 31 août, sur un nombre  $N$  de ceps observés, en moyenne 400) de 481 parcelles et 7 cépages suivis entre 2003 et 2021 en Alsace-Lorraine, Bordelais, Bourgogne, Charentes, Champagne et Val de Loire.

### 2.2 Données climatiques

Pour décrire le contexte climatique de chaque parcelle chaque année, faute de couverture spatiale suffisante par le réseau national de stations météorologiques, le jeu de données météorologiques interpolées SAFRAN (Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige) a été utilisé. Les données climatiques SAFRAN proviennent de Météo-France et ont été téléchargées via la plateforme SICLIMA développée par AgroClim-INRAE. Ces données climatiques journalières historiques sont issues de réanalyse spatialisées à une résolution horizontale de 8 x 8 km (Vidal et al. 2010). Il faut ici noter que ces données comportent bien sûr certaines limites et notamment un « biais froid » en raison d'une sous-

estimation du rayonnement infra-rouge (Le Moigne et al. 2020).

Plusieurs variables climatiques ont été sélectionnées comme l'humidité relative, l'évapotranspiration potentielle et réelle, les précipitations, les températures ou encore l'indice d'humidité du sol et ont été extraites pour la période d'intérêt 2003-2021 pour chaque parcelle étudiée (objectif 1). Les valeurs moyennes, ou minimales et maximales de ces variables ont été calculées pour différentes périodes précédant les incidences hebdomadaires de l'esca au vignoble (de 7 jours à 4 mois), afin de modéliser le rôle du climat dans l'expression de l'esca.

Pour l'objectif (2), les variables climatiques sont calculées en fonction de la phénologie de chaque cépage de vigne (indicateurs écoclimatiques). Les calculs d'indicateurs ont été réalisés à partir de la plateforme SICLIMA (AgroClim-INRAE) qui intègre la bibliothèque d'indicateurs développée par Garcia de Cortazar-Atauri and Maury (2019) et qui utilise l'approche des indicateurs écoclimatiques développée par Caubel et al., 2015. Le modèle permet le calcul de stades de phénologie chaque année sur une gamme de cépages et les indicateurs écoclimatiques sont calculés entre ces stades phénologiques (<https://agroclim.inrae.fr/siclima/help/decouvrir/calcul.html>).

## 2.3 Modélisations statistiques

Les relations entre le climat et l'évolution de l'esca au cours de la saison (objectif 1) ont été testées à l'aide d'une approche d'ensemble de modèles linéaires à effets mixtes (Fréjaville et al. 2020). Les variables climatiques ont été définies comme des effets fixes. Le site (vignoble) a été inclus comme covariable à effet aléatoire, de même que l'âge de la plante, le cépage (n=11) et la région d'étude (Sud-Ouest vs. Sud-Est). Avant de tester différentes combinaisons de variables climatiques pour obtenir un ensemble de modèles, nous avons sélectionné les variables climatiques et les différentes périodes d'influence du climat (7, 15, 30, 60 ou 90 jours précédant l'expression des symptômes) en ajustant un modèle linéaire à effets mixtes, avec ou sans terme quadratique et en le comparant à un modèle dit « nul » (sans variable climatique) en utilisant le critère d'information d'Akaike de second ordre (AICc).

Concernant l'effet des indicateurs écoclimatiques sur l'incidence annuelle de l'esca en France (objectif 2), nous avons utilisé un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) dans un cadre bayésien avec les méthodes INLA (integrated nested Laplace approximation ; Rue et al., 2017). La probabilité de présence de l'esca sur la parcelle a été modélisée à l'aide d'une distribution binomiale avec une fonction de lien logit. Les différents cofacteurs (l'année en interaction avec le cépage et l'âge de la parcelle) ont été pris en compte afin d'estimer leur contribution à l'incidence des symptômes foliaires de l'esca à l'échelle de la parcelle. Le modèle incluait l'identité de la parcelle en tant qu'effets aléatoires indépendants, l'âge de la parcelle modélisée comme un processus autorégressif d'ordre 1 (AR1) et enfin, l'année comme un second processus AR1 spécifique de chaque cépage.

## 3. Résultats

Concernant l'incidence hebdomadaire, les modèles ont indiqué un effet de la sécheresse de l'air et du sol, et de l'évapotranspiration réelle au cours des deux à quatre mois précédant l'expression des symptômes. Plus la transpiration de la plante est élevée (climat humide et chaud), plus l'incidence hebdomadaire de nouveaux cas était élevée. Au contraire, l'incidence estivale de

l'esca diminue avec des printemps chauds et secs (VPD élevé). En outre, nous avons constaté que la température printanière était le principal facteur de la phénologie de la maladie, les symptômes apparaissant plus tôt après des printemps plus chauds. Nos résultats suggèrent qu'un climat plus chaud peut conduire à des symptômes plus précoces de l'esca dans la saison et diminuer son l'incidence en raison de sécheresse accrue (effet direct du réchauffement), puisque l'esca est inhibé en conditions sèches.

Les principaux résultats de l'effet du climat sur l'expression annuelle de l'esca indiquent d'une part, que l'augmentation des températures moyennes pendant la dormance était accompagnée d'une augmentation de l'incidence annuelle de l'esca mais que d'autre part, cette augmentation des températures moyennes avait l'effet inverse pendant les périodes de croissance de la vigne et d'expression des symptômes d'esca. L'augmentation du VPD et la diminution de la disponibilité en eau du sol (SWI) et de l'évapotranspiration du couvert végétal étaient accompagnées d'une diminution de l'incidence annuelle de l'esca. Parmi les différentes périodes phénologiques testées (dormance, période de croissance, période d'expression des symptômes d'esca), toutes présentent des indicateurs écoclimatiques influençant significativement l'incidence de l'esca et particulièrement la période d'expression des symptômes avec la température moyenne et le SWI qui ont les effets les plus forts.

## 4. Conclusion

Nos différentes approches de modélisation ont permis de tester les relations *in situ* entre l'incidence de l'esca (intra- et inter-saisonnière) et le climat, en plus d'autres facteurs de variation tels que le temps, l'âge des parcelles viticoles et le cépage. Nous avons constaté que la corrélation positive intrinsèque entre la température de l'air et son déficit de vapeur d'eau (VPD) était le principal facteur de variation de l'incidence des symptômes foliaires de l'esca au cours de la saison. Des printemps chauds et secs réduisent l'incidence hebdomadaire de l'esca au cours de l'été, avec des symptômes néanmoins plus précoces. De la même manière, la modélisation des données de surveillance nationale va dans le même sens, avec un rôle clé du climat printanier (période de croissance) mais aussi du climat de la période d'expression, de la température et de variables conditionnant la transpiration de la plante. Ces résultats confortent ceux obtenus en conditions contrôlées démontrant le rôle de l'état hydrique de la vigne dans la pathogénèse de l'esca (Bortolami et al. 2021). Cependant, le facteur sous-jacent de ces variations d'incidence pourrait être soit la transpiration de la plante, soit l'activité fongique, ou les deux, ce qui nécessitera de nouvelles études plus approfondies. Enfin, notre étude tend à confirmer que des conditions plus sèches dans le cadre du changement climatique pourraient limiter l'incidence des maladies du bois de la vigne.

## Bibliographie

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.T. and Gonzalez, P. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, 259(4), pp.660-684.
- Bertsch, C., Ramírez-Suero, M., Magnin-Robert, M., Larignon, P., Chong, J., Abou-Mansour, E., ... Fontaine, F. (2013). Grapevine trunk diseases : Complex and still poorly understood. *Plant Pathology*, 62(2), 243-265. doi: 10.1111/j.1365-3059.2012.02674.x

- Bortolami, G., Gambetta, G. A., Cassan, C., Dayer, S., Farolfi, E., Ferrer, N., ... Delmas, C. E. L. (2021). Grapevines under drought do not express esca leaf symptoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(43). doi: 10.1073/pnas.2112825118
- Caubel, J., de Cortázar-Atauri, I.G., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P. and Graux, A.I., 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. *Agricultural and forest meteorology*, 207, pp.94-106.
- Chaloner, T. M., Gurr, S. J., & Bebber, D. P. (2021). Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, 11(8), 710-715. doi: 10.1038/s41558-021-01104-8
- Dewasme, C., Mary, S., Darrieutort, G., Roby, J.P. and Gambetta, G.A., 2022. Long-Term Esca Monitoring Reveals Disease Impacts on Fruit Yield and Wine Quality. *Plant disease*, 106(12), pp.3076-3082.
- Fréjaville, T., Vizcaíno-Palomar, N., Fady, B., Kremer, A., & Garzón, M. B. (2020). Range margin populations show high climate adaptation lags in European trees. *Global Change Biology*, 26(2), 484-495. doi: 10.1111/gcb.14881
- Garcia De Cortazar Aauri, I. ; Maury, O. (2019). "GETARI : Generic Evaluation Tool of AgRoClimatic Indicators", DOI 10.15454/IZUFAP, Recherche Data Gouv, VI
- Gramaje, D., Urbez-Torres, J.R. and Sosnowski, M.R. (2018). Managing grapevine trunk diseases with respect to etiology and epidemiology: current strategies and future prospects. *Plant disease*, 102(1), pp.12-39.
- Hammond, W.M., Williams, A.P., Abatzoglou, J.T., Adams, H.D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D.D. and Allen, C.D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), p.1761.
- Lecomte, P., Bénétreau, C., Diarra, B., Meziani, Y., Delmas, C. and Fermaud, M. (2024). Logistic modeling of summer expression of esca symptoms in tolerant and susceptible cultivars in Bordeaux vineyards. *OENO One*, 58(1).
- Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M. and Leroux, D., 2020. The latest improvements with SURFEX v8. 0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France. *Geoscientific Model Development*, 13(9), pp.3925-3946.
- Nutter, F.W., Esker, P.D. and Netto, R.A.C. (2006). Disease assessment concepts and the advancements made in improving the accuracy and precision of plant disease data. *European Journal of Plant Pathology*, 115, pp.95-103.
- Rue, H., Riebler, A., Sørbye, S.H., Illian, J.B., Simpson, D.P. and Lindgren, F.K. (2017). Bayesian computing with INLA: a review. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 4, pp.395-421.
- Torres-Ruiz, J.M., Cochard, H., Delzon, S., Boivin, T., Burlett, R., Cailleret, M., Corso, D., Delmas, C.E., De Caceres, M., Diaz-Espejo, A. and Fernández-Conradi, P., 2024. Plant hydraulics at the heart of plant, crops and ecosystem functions in the face of climate change. *New Phytologist*, 241(3), pp.984-999.
- Vidal, J., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644. doi: 10.1002/joc.2003